

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Zjišťování magnetických vlastností  
typových konstrukčních ocelí**

**Recognition of Magnetic Properties of  
Structural Steels**

2010

Bc. Roman Žurovec

**Prohlášení:**

*„Místopřísežně prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

V Ostravě

Dne: 30.4.2010

**Poděkování:**

*Na tomto místě bych rád poděkoval ing. Martinu Markovi Ph.D. za poskytnutí odborné pomoci a zázemí pro vypracovávání této diplomové práce.*

## **Abstrakt**

Práce se věnuje zjišťování magnetických vlastností typových konstrukčních ocelí.

První část této diplomové práce je především věnována přehledu konstrukčních ocelí včetně jejich chemického složení. Dále je zde popsán systém značení podle české normy ČSN a také systém značení podle evropské normy EN.

Druhá část práce je zaměřena na popis magnetických vlastností látek a materiálů. Je zde také uvedeno rozdělení látek a materiálů dle těchto vlastností. Dále jsou zde popsány způsoby měření magnetických vlastností, specializované pro měření magneticky měkkých feromagnetických materiálů.

Třetí část práce popisuje přípravu a vlastní provedené měření magnetických vlastností typových konstrukčních ocelí. A také znázornění a vyhodnocení výsledků tohoto měření.

## **Klíčová slova**

Diamagnetismus, ferit, feromagnetismus, hysterezní smyčka, konstrukční ocel, magneticky měkké feromagnetikum, magneticky tvrdé feromagnetikum, magnetizační křivka, relativní permeabilita.

## **Abstract**

Work focuses on determining the magnetic properties of type steels.

The first part of this thesis is mainly devoted to an overview of structural steels, including their chemical composition. Furthermore, there is described a marking system according to Czech standards ČSN, and the marking system in accordance with European Standard EN.

The second part focuses on the characterization of magnetic properties of substances and materials. There is also a breakdown of substances and materials according to these properties. There are also described methods of measurement of magnetic properties, measurements specialist for magnetically soft ferromagnetic materials.

The third part describes the preparation and the measurement of magnetic properties by the type of structural steels. And the representation and evaluation of the results of this measurement.

## **Key words**

Diamagnetism, ferrite, ferromagnetism, hysteresis loop, structural steel, magnetically soft materials, magnetically hard materials, magnetization curve, relative permeability.

## Seznam některých použitých symbolů a značek

<i>symbol</i>	<i>název</i>	<i>jednotka</i>
$B$	Magnetická indukce	(T)
$B_{max}$	Maximální hodnota magnetické indukce	(T)
$BH_{max}$	Maximální energetický součin	(kJ/m <sup>3</sup> )
$B_r$	Remanentní magnetizace	(T)
$f$	frekvence	(Hz)
$H$	Intenzita magnetického pole	(A/m)
$H_c$	Koercitivní síla	(A/m)
$H_{max}$	Maximální hodnota intenzity magnetického pole	(A/m)
$J$	Vektor polarizace	(T)
$l_{stř}$	Střední siločára	(mm)
$M$	Vektor magnetizace	(A/m)
$t_m$	Maximální pracovní teplota	(°C)
$W$	Hysterezní ztráty	(kJ/m <sup>3</sup> )
$\alpha(B_r)$	Teplotní součinitel remanence	(%/°C)
$\alpha(H_{cJ})$	Teplotní součinitel koercitivní síly $H_{cJ}$	(%/°C)
$\Phi$	Magnetický tok	(Wb)
$m$	Absolutní permeabilita	(-)
$m_0$	Permeabilita vakua	(4. $\pi$ .10 <sup>-7</sup> )
$m_r$	Relativní permeabilita	(-)
$\kappa$	Magnetická susceptibilita	(-)

## Obsah

Abstrakt	4
Seznam některých použitých symbolů a značek	5
Úvod	7
1. Konstrukční oceli	8
1.1. Značení konstrukčních ocelí	8
1.2. Třídy konstrukčních ocelí dle normy ČSN 42 0002	11
1.3. Přehled konstrukčních ocelí	12
2. Magnetické vlastnosti látek a materiálů	34
2.1. Popis jednotlivých typů materiálů	36
2.2. Feromagnetické materiály	38
2.3. Měření magnetických vlastností látek a materiálů	40
2.3.1. Měření na uzavřených vzorcích	41
2.3.2. Měřicí systémy	45
3. Vlastní řešení - Analýza magnetických vlastností typových vzorků ocelí	48
3.1. Přehled a příprava vzorků	48
3.2. Vlastní měření	53
3.2.1 Přehled změřených magnetických vlastností jednotlivých vzorků	53
3.2.2 Porovnání magnetických vlastností jednotlivých sérií vzorků ve statickém magnetickém poli	65
3.2.3 Porovnání magnetických vlastností jednotlivých sérií vzorků v dynamickém magnetickém poli	69
3.2.4 Celkové zhodnocení výsledků	73
4. Závěr	73
Literatura a jiné zdroje	74
Seznam příloh	75

# Úvod

Ocel je kovový materiál, který našel uplatnění v nesčetném množství výrobních i nevýrobních odvětví. Základním prvkem oceli je železo. Přidáním vhodných prvků jako je například uhlík, mangan, křemík a mnoho dalších a následným zpracováním (tepelným, mechanickým) lze ovlivnit vlastnosti těchto materiálů podle potřeby a použití.

Mezi konstrukčními materiály mají konstrukční oceli mnohdy nenahraditelné postavení. Našly uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti, jako je například strojírenství, stavebnictví, doprava, zemědělství, chemický průmysl, elektrotechnický průmysl a mnoho dalších.

Pro různá použití jsou požadovány různé mechanické, tepelné, chemické, fyzikální vlastnosti, kterých lze dosáhnout úpravou chemického složení či následnou úpravou povrchu aj. Mechanické vlastnosti oceli charakterizují vždy, zatímco určení magnetických vlastností již tak běžné není. V moderní době se stále více věnuje pozornost magnetickým vlastnostem konstrukčních materiálů. Zejména v oblasti elektrotechniky, ale i v ostatních odvětvích průmyslu.

Z těchto důvodů se tato práce věnuje právě zjištění magnetických vlastností typových konstrukčních ocelí. Většina vzorků ocelí, pro které jsou v této práci magnetické vlastnosti zjišťovány, se používají pro výrobu kolejnic.



### Systém evropského značení:

Dle evropských norem lze materiály označovat jednak systémem zkráceného označování dle normy ČSN EN 10027-1 a také systémem číselného označování dle normy ČSN EN 10027-2.

#### A) Systém zkráceného označování ocelí dle ČSN EN 10027-1 :

Označování oceli je složeno z písmen a čísel.

*Schéma značky:*

Základní symbol      číslo

└───┐      └───┐  
      └───┘      └───┘  
      S      x x x

Písmena a čísla vyjadřují základní charakteristické znaky oceli. Třídění je uvedeno v následujícím odstavci.

a) Značky vytvořené na základě použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností:

S – oceli pro ocelové konstrukce pro všeobecné použití

P – oceli pro tlakové nádoby

L – oceli na potrubí

E – oceli na strojní součásti

G – oceli na odlitky

- po písmenu (S, P, L nebo E) následuje číslo vyjadřující minimální mez kluzu v  $\text{N mm}^{-2}$  pro nejmenší tloušťku výrobku

B – oceli pro výztuž do betonu

- následující číslo pak vyjadřuje mez kluzu  $\text{N mm}^{-2}$

H – ploché výrobky válcované zastudena z ocelí k tažení a vyšší pevností

D – ploché výrobky z měkkých ocelí pro tažení zastudena

R – oceli na kolejnice

- následující číslo odpovídá minimální pevnosti v tahu  $\text{N mm}^{-2}$

T – tenké a pocínované plechy a pásy; pochromované plechy a pásy

M – plechy a pásy pro elektrotechniku

Jedná-li se o oceli na odlitky, přidá se před označení písmeno G.

b) Značky vytvořené na základě chemického složení oceli:

- nelegované oceli (s výjimkou automatových) se středním obsahem manganu pod 1%:

C + čísla odpovídající stonásobku středního obsahu uhlíku

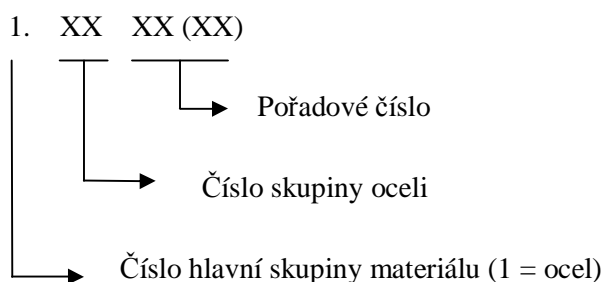
- Nelegované oceli se středním obsahem  $\text{Mn} \geq 1 \%$ , nelegované automatové oceli a legované oceli (kromě rychlořezných) se středními obsahy jednotlivých legujících prvků  $< 5 \%$ :



Číslo odpovídající stonásobku středního obsahu uhlíku + chemické symboly legujících prvků + čísla vyjadřující obsah charakteristických legujících prvků

- Korozivzdorné a legované oceli (kromě rychlořezných) s obsahem minimálně jednoho legujícího prvku  $\geq 5\%$ :  
X + číslo odpovídající stonásobku střední hodnoty rozsahu předepsaného pro obsah uhlíku + chemické symboly legujících prvků charakterizujících ocel + čísla udávající obsahy charakteristických legujících prvků.
- Rychlořezné oceli  
HS + čísla udávající obsahy prvků v následujícím pořadí: wolfram (W), molybden (Mo), vanad (V), kobalt (Co).

B) Systém číselného označování ocelí dle ČSN EN 10027-2:



Takto popsané systémy značení byly převzaty z literatury [7].

## 1.2 Třídy konstrukčních ocelí dle normy ČSN 42 0002

Konstrukční oceli lze dle české normy ČSN 42 0002 rozdělit do devíti základních tříd. Jsou to třídy 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 a 19. Tyto čísla tvoří vždy první dvě číslice značky oceli. Rozdělení je uvedeno v tab. 1.

**Tab. 1.** Rozdělení ocelí do tříd – význam prvního dvojčíslí

Třída oceli	Oceli podle		Charakteristika ocelí
	použití	stupně legování	
10	Konstrukční	nelegované	Předepsané hodnoty mechanických vlastností, chemické složení není předepsáno
11			Předepsané hodnoty mechanických vlastností a obsah C, P, S popř. (P+S) a dalších prvků
12			Předepsaný obsah C, Mn, Si, P, popř. (P+S) i dalších prvků
13		nízkolegované	Legovací prvky: Mn, Si, Mn-Si, Mn-V
14			Legovací prvky: Cr, Cr-Al, Cr-Mn, Cr-Si, Cr-Mn-Si
15			Legovací prvky: Mo, Mn-Mo, Cr-Mo, Cr-V, Cr-W, Mn-Cr-V, Cr-Mo-V, Cr-Si-Mo-V, Cr-Mo-V-W
16		legované	Nízkolegované a středně legované
17			Středně legované a vysokolegované
19	Nástrojové	nelegované	Předepsaný obsah C, Mn, Si, P, S
		Legované (nízko, středně, vysoko)	Legovací prvky: Cr, V, Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-Si, Cr-V, Cr-W, Cr-Al, Cr-Ni-W, Cr-Si-V, Cr-Mo-V, Cr-V-W, Cr-Ni-Mo-V, Cr-V-W-Co, Cr-Ni-Mo-W, Cr-Ni-V-W, atd.

Tabulka byla převzata z literatury [7].

## 1.3 Přehled konstrukčních ocelí

V této kapitole bylo čerpáno z literatury [1], [8], [10].

V této kapitole si detailně rozebereme jednotlivé třídy konstrukčních ocelí včetně jejich chemického složení a možného použití. Vzhledem k rozsáhlosti sortimentu konstrukčních ocelí nebudou v této práci uvedeny všechny tabulky s chemickým složením jednotlivých ocelí. Kompletní přehled je uveden v příloze 1 na disku CD.

Přehled konstrukčních ocelí je koncipován dle následující osnovy:

- A. Nelegované oceli (oceli třídy 10 až 12)
  - Ø Oceli obvyklých jakostí
  - Ø Automatové oceli
  - Ø Oceli na hluboký tah
  - Ø Oceli na odlitky
- B. Nízkolegované oceli na zušlechťování (oceli třídy 13 až 16)
- C. Korozi-vzdorné a žáruvzdorné oceli tvářené a na odlitky (oceli třídy 17)
- D. Oceli pro speciální použití

### A. Nelegované oceli (oceli třídy 10 až 12)

#### Ø Oceli obvyklých jakostí

##### Oceli třídy 10

Nelegované oceli třídy 10 obvyklých jakostí se dodávají jako tyče, plechy, pásy, dráty, výkovky a trubky. Většinou se u těchto ocelí nezaručuje chemické složení, někdy je v materiálových listech pouze omezen obsah fosforu a síry. Protože měď zhoršuje svařitelnost i tváritelnost, bývá její obsah obvykle max. 0,30%. Dodávají se většinou bez tepelného zpracování, tlusté plechy také normalizačně žíhané.

Na všeobecné použití jsou vhodné oceli obchodní jakosti 10 000 a 10 004, u kterých se zaručuje maximální pevnost v tahu a úhel ohybu při zkoušce. Oceli se používají na výrobky, které se nenavrhují podle výpočtů z pevnostních hodnot a které nemají nosné sváry. U oceli jakosti 10 004 se zaručuje max. 0,060% P a S. U ocelí jakosti 10 005, 10 370 a 10 420 se nepředepisuje chemické složení, zaručuje se však minimální pevnost v tahu, mez kluzu a tažnost.

Oceli této třídy nejsou vhodné pro použití při teplotách pod -30°C, protože příliš klesá jejich vrubová houževnatost. Nepoužívají se také na cementování, zušlechťování a povrchové kalení. Ve třídě 10 je také zařazena jednoúčelová ocel ON 10 451, ze které se vyrábějí nýty pro nýtované konstrukce z ocelí jakosti 11 523 a 11 483. Některé oceli třídy 10 se používají na trubky. Zvláštní skupinu tvoří oceli na výztuž betonářských konstrukcí.

##### Ocel třídy 11

U konstrukčních ocelí třídy 11 obvyklých jakostí se zaručuje maximální obsah uhlíku. Nedoporučuje se používat tyto oceli na zušlechťování, cementování a povrchové kalení z důvodu neurčené spodní hranice obsahu uhlíku a také proto, že se převážně dodávají jako neuklidněné.

Používají se obvykle v přírodním stavu. U těchto ocelí je nutno počítat s větší nerovnoměrností chemického složení, hlavně obsahu síry a fosforu.

V této třídě je zařazena skupina ocelí, které jsou vhodné na svařované konstrukce pracující za normální teploty. Obsah uhlíku se obvykle omezuje na max. 0,20%, mimořádně na max. 0,25%, protože zejména tento prvek zhoršuje svařitelnost.

Neuklidněné oceli jsou vhodné na svařované součástky s tloušťkou stěny max. 16mm, oceli uklidněné křemíkem do tloušťky 25mm. Při větší tloušťce stěny se používají oceli uklidněné hliníkem nebo mikrolegované niobem, vanadem, či titanem. Chemické složení svařitelných ocelí obvyklé jakosti je uvedeno v tab. 2.

Oceli značky 11 353, 11 453, 11 550, 11 650 se používají na výrobu bezešvých trubek obvyklé jakosti. Ve třídě 11 je několik skupin ocelí pro speciální použití, jako jsou oceli automatové, hlubokotažné, pro nízké teploty a se sníženým sklonem ke stárnutí. Tyto skupiny jsou blíže popsány níže. Do skupiny svařitelných ocelí je možno zařadit také ocel 11 354, která se používá na svařované řetězy.

**Tab. 2.** *Nelegované oceli tř. 11.  
Svařitelné oceli obvyklých jakostí*

Značka	Chemické složení v %							Poznámka
	C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Ti max.	Al max.	
11 342	0,10	0,45	0,15	0,030	0,025	0,06-0,2		U
11 343	0,17			0,050	0,050			N,PU
11 375	0,20			0,050	0,050			U,PU
11 378	0,16			0,045	0,045		0,0020	U
11 402	0,10	0,55	0,15	0,030	0,025	0,06-0,2		U
11 423	0,24			0,050	0,050			N,PU
11 425	0,22			0,050	0,050			U

U ...uklidněná ocel, N ...neuklidněná ocel, PU ...polouklidněná ocel

Složení dalších ocelí třídy 11 lze najít v příloze 1.

## Oceli třídy 12

Tyto oceli se označují jako ušlechtilé nelegované oceli, protože mají již vymezené hranice chemického složení a jsou proto vhodné na zušlechťování. Mají se používat v zušlechťovaném stavu, kdy mají maximální mechanické vlastnosti, protože jsou dražší než oceli tříd 10 a 11.

Obsah uhlíku je odstupňován od 0,22 do 0,70%, větší změnu mechanických vlastností po zušlechťování je však možno očekávat až při obsahu uhlíku nad 30%. Při kalení nelegovaných ocelí tř. 12 je třeba počítat s jejich malou prokalitelností. Oceli 12 042 a 12 052 obsahují přísadu boru v rozmezí 0,001 až 0,005%, který zvyšuje prokalitelnost. Ocel značky 12 042 si zachovává dobré plastické vlastnosti i při snížených teplotách. Na těžké výkovky je vhodná ocel značky 12 140 s přísadou vanadu, který zaručuje jemnozrnnou strukturu po normalizačním žhání i u součástek s vyšší tloušťkou stěny.

Pokud se vyžadují zaručené magnetické vlastnosti, používá se magneticky měkká ocel značky 12 014, která má vysokou koercitivní intenzitu magnetického pole.

Chemické složení ocelí třídy 12 je uvedeno v příloze 1. Zde si pro představu uvedeme pouze několik vybraných ocelí.

**Tab. 3.** Vybrané tvářené nelegované oceli tř. 12

Značka	Chemické složení v %								Poznámka
	C	Mn	Si	P max.	S max.	Cr max.	Ni max.	Cu max.	
12 014	max. 0,06	max. 0,45	max. 0,15	0,020	0,020				min 0,02% Al kov
12 042	0,32-0,40	0,50-0,80	max. 0,35	0,040	0,040				B 0,001-0,005
12 052	0,42-0,50	0,50-0,80	max. 0,35	0,040	0,040				B 0,001-0,005
12 060	0,52-0,60	0,50-0,80	0,17-0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30	
12 140	0,30-0,38	0,50-0,80	0,17-0,37	0,035	0,035	0,25	0,30	0,30	V 0,08-0,15

### Ø Automatové oceli

Z těchto ocelí se na automatech vyrábějí šrouby, matice, kolíky apod. Při obrábění se musí tvořit lámavá tříška, která plynule odpadává, aby byla u stroje dosažena minimální obsluha. Používané oceli mají obvykle zvýšený obsah síry nebo fosforu, některé mají malou přísadu olova. Výhodné jsou přísady, které na nástroji tvoří tenkou vrstvičku, bránící přímému styku obráběné oceli s nástrojem. Tím se zvyšuje životnost bříty. Oceli mají mít také nízký obsah tvrdých lidických vměstků, které zvyšují opotřebení bříty.

Chemické složení našich automatových ocelí se zvýšeným obsahem síry a manganu je kompletně uvedeno v příloze 1. Následující tabulka uvádí několik příkladů.

**Tab. 4.** Vybrané automatové oceli

Značka	Chemické složení v %					
	C	Mn	Si max.	P max.	S	jiné
11 109	max. 0,13	0,90-1,50		0,100	0,21-0,32	
11 120	0,15-0,25	0,60-1,10	0,40	0,100	0,14-0,24	
11 121	max. 0,16	0,90-1,60	0,40	0,100	0,21-0,32	Ti 0,04-0,32
12 012	max. 0,09	0,20-0,50	max. 0,15	0,035	0,040	min. 0,02% Al dezox. SiCa

### Ø Oceli na hluboký tah

Z ocelí této skupiny se vyrábějí tvářením za studena, ale také za tepla plechy vhodné pro další zpracování za studena. Po těchto ocelích se požaduje co nejnižší mez kluzu. Nejjakostnější oceli mají mez kluzu max. 160 MPa a tažnost minimálně 45%.

Mez kluzu zvyšuje zejména uhlík, jehož obsah se proto snižuje pod 0,10%. Obsah manganu se pohybuje mezi 0,20 až 0,60. Určité množství manganu je nutné na vázání síry, aby se zaručila tvářitelnost za tepla. Obsah křemíku má být co nejnižší, protože zvyšuje mez kluzu a pružnost. Je

vhodné ho snížit pod 0,05%. Fosfor zpevňuje ferit a zvyšuje jeho křehkost. Omezuje se proto na max. 0,030 až 0,035%. Obsah síry musí být co nejnižší, protože sulfidy zhoršují tváritelnost. Chrom, nikl, molybden a měď zvyšují pevnost feritu, jejich obsah má být proto nižší než 0,12 až 0,15%.

Oceli uklidněné hliníkem mají menší sklon ke stárnutí, ale jemnější zrna, takže mají vyšší mez kluzu. Výhodné je, že hliník nezvyšuje mez kluzu feritu. Jeho obsah se pohybuje mezi 0,02 až 0,05%. Nevýhodou uklidněných ocelí je horší povrch ingotu a tím i plechu.

Na smaltované plechy jsou vhodné hlubokotažné neuklidněné oceli s nízkým obsahem uhlíku a síry (11 301, 11 304).

Kompletní přehled ocelí na hluboký tah je uvedena v příloze 1. V tabulce 5 je několik příkladů.

**Tab. 5.** *Oceli na hluboký tah*

Značka	Chemické složení v %					Skupina	Způsob výroby
	C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.		
11 301	0,08	0,40		0,030	0,030	HT	N
11 305	0,07	0,40		0,025	0,025	VT, min. 0,025% Al	U
11 325	0,10	0,45		0,035	0,035	ST, min. 0,020% Al	U
11 331	0,11	0,45		0,035	0,035	MT	N
12 011	0,09	0,20-0,45	0,15	0,035	0,040	min. 0,020% Al kov	1

Podle ČSN 42 0127 se ocelové plechy na tažení válcované za studena rozdělují na plechy vhodné na mírné, střední, hluboké a velmi hluboké tažení, jak je uvedeno v následující tabulce.

**Tab. 6.** *Rozdělení ocelí na hluboký tah podle ČSN 42 0127*

Označení	Charakteristika
MT	Vhodné na mírné tažení
ST	Vhodné na střední tažení
HT	Vhodné na hluboké tažení
VT	Vhodné na velmi hluboké tažení

### Ø Oceli na odlitky

Oceli na odlitky mají některé specifické vlastnosti. Protože odlitky dostávají svůj konečný tvar ve formě, jejich mechanické vlastnosti závisejí na chemickém složení, tepelném zpracování, lící teplotě a tloušťce stěny tj. na rychlosti chladnutí ve formě. Taví vždy jako uklidněné. Na konečnou dezoxidaci se používá obvykle hliník.

Oceli na odlitky mají nižší plastické vlastnosti než oceli tvářené. Výhodou odlitků je, že se u nich nevyskytuje anizotropie mechanických vlastností jako u tvářených ocelí.

Mechanické vlastnosti nelegovaných ocelí na odlitky závisejí na obsahu uhlíku. Mez kluzu a pevnost s rostoucím obsahem uhlíku plynule zvyšují, plastické vlastnosti se naopak snižují.

Plastické vlastnosti ocelí na odlitky snižují fosfor a síra.

Odlitky z nelegovaných ocelí se vždy normalizačně žíhají. Normalizační teploty jsou vyšší než u tvářených ocelí, pohybují se mezi 900 až 920 °C. Vliv tloušťky stěny na mechanické vlastnosti je malý. Po normalizačním žíhání se zařazuje vždy žíhání na snížení pnutí na teplotě 600 až 630°C. Po ukončení výdrže se ochlazuje v peci nebo na klidném vzduchu. Při rychlejším ochlazování se získává vyšší mez kluzu a vrubová houževnatost.

Odlitky z nelegovaných ocelí se zušlechťují jen zřídka, protože mají většinou komplikovaný tvar a při kalení do vody je větší nebezpečí praskání.

Chemické složení některých našich nelegovaných ocelí na odlitky je v tab. 7. Kompletní tabulka je uvedena v příloze 1.

**Tab. 7.** *Nelegované oceli na odlitky*

ČSN	Chemické složení v %					
	C	Mn	Si	P max.	S max.	P+S max.
				Zásaditá pec		
				Kyslá pec		
42 2630	0,10-0,20	0,40-0,80	0,20-0,50	0,050 0,060	0,050 0,060	0,090 0,110
42 2633	0,10-0,18	0,500,90	0,20-0,50	0,040	0,040	0,070
42 2650	0,28-0,38	0,40-0,80	0,20-0,50	0,050 0,060	0,050 0,060	0,090 0,110

## **B. Nízkolegované oceli na zušlechťování**

Tyto nízkolegované oceli představují třídy 13, 14, 15 a 16. V následujícím textu jsou blíže popsány.

### Ocel třídy 13

Ve třídě 13 jsou zařazeny manganové, manganovanadové, křemíkové a manganokřemíkové oceli. Chemické složení těchto ocelí je uvedeno v příloze 1. Příklady ocelí třídy 13 jsou uvedeny v tab. 8.

Nízkolegované manganové oceli (značky 13 127, 13 141, 13 142, 13 320) mají odstupňovaný obsah uhlíku od 0,14 do 0,44%, takže je možno získat tepelným zpracováním oceli s vyšší pevností nebo naopak s vyšší houževnatostí a se zaručenou svařitelností. Se stoupajícím obsahem manganu se zvyšuje prokalitelnost.

Manganové oceli mají sklon k růstu zrna při austenitizaci. Aby se tento jev zmírnil, legují se malým množstvím vanadu (ČSN 13 124, 13 220, 13 221, 13 242). Obsah uhlíku je opět odstupňován od 0,16 do 0,46%. Oceli 13 220 a 13 221 mají vyšší mez kluzu.

Oceli této třídy mají například toto využití. Ocel 13 127 se používá na bezešvé trubky, 13 142 na nádoby na stlačený plyn, 13 220 je svařitelná ocel s vyšší mezí kluzu.

Obsah křemíku u tvářených konstrukčních ocelí na zušlechťování nebývá vyšší než 1,80%, protože se při jeho vyšším obsahu příliš zvyšují plastické vlastnosti.

Samostatnou skupinu křemíkových ocelí tvoří oceli na dynamové a transformátorové plechy, u kterých se požaduje nízká koercitivní síla, vysoký elektrický odpor a vysoká permeabilita. Protože však křemík současně zhoršuje tvářitelnost, omezuje se jeho horní hranice na max. 4,5%. Obsah uhlíku má být co nejnižší (max. 0,04%), protože zhoršuje permeabilitu. Obsah ostatních prvků musí být nízký. Obvykle se připouští max. 0,12% Mn, 0,040% P, 0,005% S, 0,14% Cu, 0,04% Cr, 0,08% Ni, 0,01% Sn, 0,005% N.

**Tab. 8.** *Nízkolegované manganové a křemíkové oceli tř. 13 na zušlechťování*

Značka	Chemické složení v %										
	C	Mn	Si	P max.	S max.	Cr	Ni	Cu max.	V	N	Al
13 127	0,14-0,20	1,00-1,40	0,20-0,50	max 0,040	max 0,040	max 0,30					min. 0,015
13 142	0,36-0,44	1,00-1,30	0,15-0,40	0,030	0,030						
13 220	0,15-0,20	1,30-1,80	0,25-0,50	0,040	0,040	max 0,30	max 0,30	0,30	0,10-0,20	0,010-0,020	min. 0,01
13 242	0,36-0,46	1,50-2,00	0,15-0,40	0,035	0,035				0,07-0,15		

#### Ocel třídy 14

Hlavním legovacím prvkem ocelí tř. 14 je chrom. Chemické složení ocelí tř. 14 na zušlechťování je uvedeno v příloze 1. Pro názornost jsou některé oceli této třídy uvedeny v tabulce 9.

Nízkolegované chromové oceli na zušlechťování se také často legují manganem a křemíkem. Chrommanganové oceli mají vysokou prokalitelnost a dobrou houževnatost, takže mohou v mnoha případech nahradit dražší chromniklové oceli. Jejich nevýhodou je, že rychleji ztrácejí houževnatost při záporných teplotách. (ocel 14 240). Mezi chromkřemíkové oceli patří ocel jakosti 14 341. Vyšší obsah křemíku posouvá pásmo nízkoteplotní popouštěcí křehkosti k vyšším teplotám, takže je možno popouštět po zakalení při nízkých teplotách, kdy si ocel zachovává vysokou pevnost.

Samostatnou skupinu nízkolegovaných chromových ocelí tvoří oceli na valivá ložiska, cementační oceli a jednoúčelová ocel na obruče kolejových vozidel a na celistvá kola (14 163). Tyto skupiny jsou blíže popsány v oddílu D. této kapitoly (Oceli pro speciální použití).

Nízkolegované oceli tř. 14 mají sklon k vysokoteplotní popouštěcí křehkosti. Pokud ji nelze potlačit rychlým ochlazením do vody, je třeba nahradit tyto oceli dražšími oceli tř. 15.

**Tab. 9.** *Nízkolegované chromové oceli tř. 14 na zušlechťování*

Značka	Chemické složení v %							
	C	Mn	Si	P max.	S max.	Cr	Ni	B
14 230	0,28-0,35	0,90-1,20	max 0,35	0,035	0,035	0,80-1,10	max. 0,40	0,001-0,005
14 240	0,32-0,40	1,50-1,90	0,17-0,37	0,035	0,035	0,20-0,40		
14 341	0,34-0,42	0,30-0,60	1,00-1,30	0,035	0,035	1,30-1,60		

#### Oceli třídy 15

Ve třídě 15 jsou zařazeny konstrukční oceli na zušlechťování s přísadou molybdenu a vanadu. Jejich chemické složení je uvedeno v příloze 1 a příklady této třídy oceli jsou uvedeny v tabulce 10. Ve skupině chrommolybdenových ocelí na zušlechťování jsou oceli 15 124, 15 130, 15 131, 15 142, 15 342, ve kterých je odstupňován obsah uhlíku od 0,17 do 0,45%. Molybden zvyšuje prokalitelnost a snižuje sklon k popouštěcí křehkosti, takže jsou tyto oceli vhodné na součástky s velkou tloušťkou stěny, které je nutno kalit v mírnějším prostředí.



Druhou skupinu konstrukčních ocelí na zušlechťování ve tř. 15 tvoří oceli chromvanadové (15 241, 15 243). Vanad zjemňuje zrna a zpomaluje jeho růst při tepelném zpracování a svařování.

Chrom-molybden-vanadová ocel značky 15 330 patří do skupiny ocelí na nitridování, která je uvedena v oddílu D. této kapitoly.

Z oceli značky 15 241 byly vyráběny torzní tyče, které však nevyhovovaly při provozu za arktických podmínek. Pro tyto případy byla vyvinuta ocel označená podnikovou značkou 39 Ni2Cr, která má toto složení: 0,35% C, 0,85% Mn, 1,05% Si, 1,55% Ni, 1,00% Cr, 0,25% Mo, min. 0,05% V.

Chrom-mangan-vanadová ocel se používá v zušlechtěném stavu s pevností 800 až 1600 MPa. Ocel značky 15 341 se používá na válce pro válcovací stolice, velká ozubená kola apod.

Samostatnou skupinu ocelí ve tř. 15 tvoří žáropevné oceli, oceli k nitridování a svařitelné oceli se zvýšenou mezí kluzu. Tyto skupiny jsou uvedeny v oddílu D. této kapitoly.

**Tab. 10.** *Nízkolegované oceli tř. 15 na zušlechťování*

Značka	Chemické složení v %							
	C	Mn	Si	P max.	S max.	Cr	Mo	V
15 124	0,17- 0,24	0,40- 0,80	0,17- 0,37	0,035	0,035	0,80- 1,10	0,15- 0,25	
15 230	0,24- 0,34	0,40- 0,80	0,17- 0,37	0,035	0,035	2,20- 2,50		0,10- 0,20
15 240	0,30- 0,40	0,70- 1,00	0,17- 0,37	0,035	0,035	0,70- 1,10		0,10- 0,20
15 341	0,35- 0,43	0,95- 1,35	0,20- 0,45	0,40	0,40	0,95- 1,35	0,20- 0,30	0,15- 0,30

#### Oceli třídy 16

Ve třídě 16 jsou zařazeny oceli, ve kterých je základním legovacím prvkem nikl, který má malý vliv na pevnost, ale podstatně zvyšuje houževnatost. Nízkolegované niklové oceli se proto používají pouze v těch případech, kde se požaduje vysoká houževnatost, zejména při záporných teplotách. Jinak se nahrazují lacinějšími manganchromovými ocelmi. Chemické složení našich ocelí je uvedeno v příloze 1. V tab. 11 jsou pro názornost uvedeny vybrané oceli této třídy. Z tabulky je patrné, že nikl se vždy kombinuje s jinými legovacími prvky, aby se získaly maximální chemické vlastnosti. Niklové oceli mají nízký, nebo střední obsah uhlíku (obvykle max. 0,50 %), protože při vyšším obsahu se po zakalení zvýší v matici obsah zbytkového austenitu. Pokud se žádá vysoká houževnatost, snižuje se obsah uhlíku pod 0,25%.

Chromniklové oceli mají dobrou prokalitelnost i houževnatost (16240, 16250, 16440, 16640). Na součástky, které mají mít v zušlechtěném stavu vysokou tvrdost, odolnost proti opotřebení, ale také houževnatost a odolnost proti dynamickému namáhání je vhodná chromniklová ocel s vyšším obsahem uhlíku (0,73% C, 0,43% Mn, 0,30% Si, 1,99% Ni, 0,32% Cr).

Další skupinou ocelí tř. 16 jsou chromniklové oceli s přísadou molybdenu (16 140, 16 343, 16 540). Protože molybden snižuje prokalitelnost a snižuje popouštěcí křehkost, jsou tyto oceli vhodné na součástky s velkou tloušťkou stěny.

**Tab. 11.** *Nízkolegované oceli třídy 16 na zušlechťování*

Značka	Chemické složení v %									
	C	Mn	Si	P max.	S max.	Cr	Ni	Mo	V	
16 221	0,18- 0,24	0,70- 1,00	0,15- 0,40	0,035	0,035	max. 0,20	1,00- 1,50		0,10- 0,25	B
16 224	0,12- 0,18	0,70- 1,00	0,12- 0,35	0,030	0,030	0,70- 1,00	0,70- 1,00	0,30- 0,50	0,03- 0,08	0,002- 0,005
16 540	0,30- 0,40	0,50- 0,80	0,15- 0,40	0,035	0,035	0,70- 1,10	2,75- 3,25	0,25- 0,40		Cu
16 310	0,18- 0,25	0,40- 0,85	0,20- 0,40	0,030	0,030	1,40- 2,00	0,80- 1,20	0,60- 0,80	0,03- 0,08	max. 0,20
16 720	0,14- 0,21	0,25- 0,55	0,17- 0,37	0,035	0,035	1,35- 1,65	4,00- 4,50	W 0,80- 1,20		

Ocel 16 140 se používá jako jednouúčelová ocel na nádoby na stlačený plyn. Ocel značky 16 343 se zvýšeným obsahem niklu je vhodná po nízkém popouštění na součástky, u kterých se žádá vyšší tvrdost a houževnatost.

Na těžké výkovky se používají chromniklové oceli s přísadou vanadu (16 310, 16 431). Při dalším zvýšení obsahu niklu si oceli zachovávají vysokou houževnatost při záporných teplotách i při větší tloušťce stěny. Na generátory nízkotlakých parních turbín až do průměru 2700 mm byla vyvinuta ocel o směrném složení 0,25% C, 1,7% Cr, 3,1% Ni, 0,5% Mo, 0,1% V.

Chrom-nikl-molybdenové oceli se dnes používají na tlakové nádoby jaderných elektráren. Samostatnou skupinu ocelí tř. 16 tvoří cementační oceli a oceli pro záporné teploty. Tyto skupiny jsou blíže uvedeny v oddílu D. této kapitoly.

#### Nízkolegované oceli na odlitky

Tyto oceli na jsou legovány stejnými prvky jako oceli tvářené. Maximální mechanické vlastnosti se získávají opět zušlechťováním. Protože odlitky při kalení snadno praskají, používají se některé oceli i po normalizačním žhání, kdy se využívá vlivu legovacích prvků na zlepšení vlastností feritu, na zjemnění perlitu, resp. na zvýšení tvrdosti cementitu. Některé legovací prvky zpomalují růst zrna nebo tvoří speciální karbidy, které zvyšují odolnost proti opotřebení.

Přehled našich nízkolegovaných ocelí na odlitky je uveden v příloze 1. V tabulce 12 je uveden příklad těchto nízkolegovaných ocelí na odlitky.

**Tab. 12.** *Nízkolegované oceli na odlitky*

Značka	Chemické složení v %									
	C	Mn	Si	P max.	S max.	Cr	Ni	Mo	V	jiné
422709	0,20- 0,28	1,20- 1,60	0,20- 0,50	0,050- 0,060	0,050- 0,060					
422715	0,34- 0,42	1,20- 1,60	0,25- 0,50	0,045	0,045	max. 0,30	max. 0,30			Ti 0,02-0,10
422726	0,30- 0,40	1,10- 1,30	0,60- 0,80	0,040	0,040	0,60- 0,90				Cu max. 0,30

Nízkolegované manganové oceli s nízkým obsahem uhlíku jsou vhodné na odlitky, u kterých se žádá vysoká houževnatost a dobrá svařitelnost (ČSN 42 2709).

U ocelí na odlitky se využívá často příznivého vlivu chromu a manganu na mechanické vlastnosti (ČSN 42 2724).

### **C. Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli tvářené a na odlitky (oceli třídy 17)**

Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli mají zvýšenou odolnost proti korozi za normální i zvýšené teploty. Je samozřejmé, že tyto oceli postupně korodují. Koroze však probíhá pomalu, takže zvýšená životnost součástí vyváží jejich vyšší cenu.

Tyto oceli se dají jednoduše rozdělit na korozivzdorné a žáruvzdorné. Je však výhodnější rozdělit je podle chemického složení resp. struktury na:

- Ø vysokolegované chromové oceli
- Ø chromniklové austenitické oceli
- Ø chrommanganové austenitické oceli s přísadou dusíku
- Ø vytvrditelné korozivzdorné oceli

#### **1) Vysokolegované chromové oceli**

Základním prvkem vysokolegovaných chromových korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí je chrom, jehož obsah se pohybuje mezi 8 až 30 %. Podle obsahu chromu, a tím i podle použití, je možno rozdělit je na:

- feritické a martenzitické oceli s obsahem chromu 8%
- feritické a martenzitické oceli s 13% chromu
- feritické a feriticko-martenzitické oceli s obsahem chromu 18%
- feritické a feriticko-karbidické oceli s obsahem 22 až 30% chromu

#### **Feritické a martenzitické oceli s obsahem chromu 8%**

Chromové oceli s obsahem 8% chromu se používají jako žáruvzdorné do teplot 750 až 800 °C. Obsah uhlíku je buď nižší než 0,15% nebo se pohybuje od 0,3 do 0,5%. Chemické složení našich ocelí s 8% chromu je v tab. 13. Oceli s vyšším obsahem uhlíku je možno zakalit na vysokou tvrdost, takže se označují také jako kalitelné žáruvzdorné oceli.

Jsou vhodné na součástky, u kterých se žádá nejen odolnost proti korozi při vyšších teplotách, ale také vysoká zapalitelnost a odolnost proti opotřebení. Typickým příkladem jejich použití jsou výfukové ventily spalovacích motorů.

**Tab. 13.** *Feritické a martenzitické oceli s 8% chromu*

Značka	Chemické složení v %						
	C	Mn	Si	P max.	S max.	Cr	jiné
17 113	max. 0,12	max. 0,60	0,80-1,30	0,040	0,035	6,00-7,50	0,4-1,0 Al
17 115	0,40-0,50	0,30-0,80	2,80-3,50	0,040	0,030	8,00-10,00	

#### Feritické a martenzitické oceli s 13% chromu

Oceli této skupiny se používají jako korozivzdorné, méně často jako žáruvzdorné do teploty 800 až 850°C. Při vyšším obsahu uhlíku je lze zakalit na vysokou tvrdost. Používají se na výkovky a odlitky vodních turbín, čerpadel a podobně.

Podle obsahu uhlíku lze oceli této skupiny rozdělit na:

- *feritické*  
Oceli této skupiny mají velmi nízký obsah uhlíku (obvykle max. 0,05%). Patří zde zahraniční ocel značky REMANIT 4512 (tab. 14), která se používá na výfukové systémy automobilů, ale také na spotřební zboží jako zahradní grily, venkovní kování dveří apod.
- *feriticko-martenzitické resp. martenzitické*  
Obsah uhlíku ovlivňuje tvrdost, pevnost a svařitelnost. Při vyšším obsahu uhlíku mají oceli vyšší pevnost, klesají však plastické vlastnosti a zhoršuje se svařitelnost. Chemické složení martenzitických korozivzdorných ocelí je v příloze 1. Tabulka 14 uvádí vybrané příklady těchto ocelí.

**Tab. 14.** *Martenzitické korozivzdorné oceli*

Značka	Chemické složení v %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni max.	P max.	S max.	
17020	max. 0,08	0,90	0,70	12,0-14,0		0,040	0,035	
17030	0,54-0,63	0,50	0,50	13,0-15,0		0,040	0,035	
422905	max. 0,15	0,70	0,70	12,0-14,0	1,00	0,040	0,040	
422906	0,15-0,30	0,70	0,70	12,0-14,0	1,00	0,040	0,040	Ti
Remanit 4512	max.0,05	1,00	1,00	10,5-12,5		0,045	0,030	[%C].6 max. 1,0

#### Feritické a feriticko-martenzitické oceli s obsahem 18% chromu

Oceli této skupiny se používaly původně jako žáruvzdorné do teploty 950°C. Méně často se z nich odlévaly odlitky pracující ve slabém korozním prostředí. Použití těchto ocelí se podstatně rozšířilo, když se zjistilo, že oceli s velmi nízkým obsahem uhlíku mají velmi dobré plastické vlastnosti. V současné době lze tyto oceli rozdělit podle obsahu uhlíku a použití na:

- oceli s obsahem uhlíku maximálně 0,03%, které se také nazývají chromové feritické korozivzdorné oceli (superferity)
- oceli s vyšším obsahem uhlíku (obvykle mezi 0,1 až 0,25%), které se používají hlavně jako žáruvzdorné, méně často jako korozivzdorné. Označují se také jako feriticko-martenzitické.

##### *Feritické oceli*

Feritické chromové korozivzdorné oceli mají větší schopnost pasivace, takže odolávají korozi pod napětím v prostředí chloridů a roztoků chloridů. Osvědčily se při výrobě kuchyňských přístrojů, přístrojů, praček, vnitřních a vnějších ozdob, různých krytů a podobně.

Chemické složení ocelí s velmi nízkým obsahem uhlíku je uvedeno v tab. 15.

**Tab. 15.** *Feritické chromové oceli s velmi nízkým obsahem uhlíku*

Značka	Chemické složení v %								
	C max.	Mn max.	Si max.	Cr	Ni max.	Mo	Ti	Nb	N max.
AK 17	0,03	1,0	1,0	17-20	0,5	1,8-2,3	0,4-0,7		0,035
ATF 1	0,015	0,8	0,8	16-18	0,6		10x %C až 0,30		0,015
ATF 2	0,015	0,8	0,8	16-18	0,6	1,5-2,5		0,2-0,3	0,015

Feritické chromové oceli s přísadou 2% molybdenu jsou vhodné na trubky na studenou i teplou vodu, zejména pokud obsahuje větší množství chloridů. Používají se také v potravinářském průmyslu při výrobě nápojů, vína, stejně jako v chemickém průmyslu a na výrobu slunečních kolektorů. Odolávají kyselině octové i mořské vodě.

Oceli legované 2% Mo a 2% Cu odolávají dobře v prostředí obsahujícím sůl.

#### *Feriticko-martenzitické oceli*

Oceli této skupiny se používají jako žáruvzdorné do teploty asi 950°C, méně často jako korozivzdorné v mírnějším korozním prostředí. Chemické složení našich tvářených ocelí a ocelí na odlitky je uvedeno v tab. 16.

**Tab. 16.** *Feriticko-martenzitické oceli s obsahem 18% chromu*

Značka	Chemické složení v %					
	C max.	Mn max.	Si max.	Cr	Ni max.	
17 040	0,10	0,90	0,70	16,0-18,5	0,60	Ti max. 0,80
17 041	0,14	0,90	0,70	16,0-18,5	0,60	
42 2911	0,25	0,90	1,50	17,0-19,0	1,00	
17 125	0,15	0,80	1,00-2,00	12,0-14,5		0,5-1,2 Al

#### Feritické a feriticko-karbidické oceli s obsahem 22 až 30% chromu

Oceli této skupiny se rozdělují na:

- feritické oceli s obsahem uhlíku max. 0,035%
- feriticko-karbidické oceli s vyšším obsahem uhlíku

#### *Feritické oceli*

Molybden zvyšuje mez kluzu a odolnost proti bodové a celkové korozi. Jeho obsah by neměl být větší než 2%, protože se při vyšším obsahu zvyšuje přechodová teplota.

V zahraničí byly vyvinuty čtyři typy ocelí Cr26Mo1, Cr26Mo1Ti, Cr29Mo4, Cr29Mo4Ni2, jejichž chemické složení je uvedeno v tab. 17.

První dvě oceli odolávají velmi dobře korozi pod napětím a jsou vhodné na součástky pracující za zvýšených korozních podmínek. Ocel s přísadou titanu se doporučuje na svařované součástky, protože není náchylná k mezikrystalové korozi.

**Tab. 17.** *Feritické oceli s přísadou molybdenu*

Značka	Chemické složení v %									
	C max.	Mn max.	Si max.	Ni max.	Cr	Mo	Cu max.	N max.	Ti	(C+N) max.
Cr26Mo1	0,01	0,40	0,40	0,50	25,0-27,5	0,75-1,50	0,20	0,02		
Cr26Mo1Ti	0,06	0,75	0,75	0,50	25,0-27,0	0,75-1,50	0,20	0,04	0,2-1,0	
Cr29Mo4	0,01	0,30	0,20	0,15	28,5-30,5	3,50-4,20	0,15	0,02		0,025
Cr29Mo4Ni2	0,01	0,30	0,20	2,0-2,5	28,5-30,5	3,50-4,20	0,15	0,02		0,025

Feriticko-karbidické oceli

Vysokolegované chromové oceli s vyšším obsahem uhlíku se používají převážně jako žáruvzdorné do teploty 1100 až 1200 °C. Obsah uhlíku u tvářených ocelí bývá max. 0,20 %, u ocelí na odlitky až 0,80%. Chemické složení těchto ocelí je uvedeno v příloze 1. V tabulce 18 je pouze několik příkladů.

**Tab. 18.** *Oceli s obsahem 20 až 30% chromu*

Značka	Chemické složení v %							
	C max.	Mn max.	Si max.	Cr	Ni max.	P max.	S max.	Ti max.
17 047	0,15	0,80	0,80	20-23	0,60	0,045	0,035	0,70
42 4912	0,50	0,90	1,50	19-22	1,00	0,045	0,040	
42 2914	0,50-0,80	0,90	1,0-2,0	27,5-30	2,00	0,045	0,045	

Oceli této skupiny se zpravidla tepelně nezpracovávají, protože pracovní teplota součástí je vysoká. Nevýhodou vysokolegovaných chromových ocelí je jejich obtížná svařitelnost a křehkost za normální teploty.

**2) Chromniklové austenitické oceli**Nestabilizované austenitické oceli

Tyto oceli mají relativně nízkou mez kluzu a pevnost. Jejich plastické vlastnosti jsou však mimořádně vysoké. Nízká mez kluzu je vhodná u ocelí určených k hlubokému tahu.

Tyto oceli mají vysokou odolnost proti korozi, odolávají však špatně korozi pod napětím a za působení chloridů. Odolnost proti organickým kyselinám a kyselině sírové se zvyšuje se stoupajícím obsahem niklu. Nestabilizované austenitické oceli zařazené v naší normě jsou uvedeny v příloze 1. Tabulka 19 znázorňuje pouze vybrané oceli této skupiny pro názornost.

**Tab. 19.** *Nestabilizované austenitické chromniklové oceli*

Značka	Chemické složení v %							
	C max.	Mn max.	Si max.	Cr	Ni	P max.	S max.	N
17 259	0,03	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-11,5			0,12-0,22
12Cr18Ni	0,08-0,12	0,50-1,50	0,50-1,50	17,5-18,5	7,5-8,5	0,025	0,030	
42 2931	0,15	1,50	1,50	18,0-21,0	8,0-11,0	0,045	0,040	

Tyto oceli jsou vhodné na tlakové nádoby do teplot až 350°C. Pokud prostředí nevyvolává mezikrytalickou korozi, je možné použít je až do teploty 550°C.

### Stabilizované austenitické oceli

Chemické vlastnosti našich stabilizovaných ocelí je uvedeno v tab. 20.

**Tab. 20.** *Stabilizované austenitické chromniklové oceli*

Značka	Chemické složení v %							
	C max.	Mn max.	Si max.	Cr	Ni	Ti	P max.	S max.
17 246	0,12	2,0	1,0	17,0-20,0	8,0-11,0	5.(%C-0,03)	0,045	0,030
17 257	0,03	2,0	1,0	23,5-26,0	19,0-22,0	Nb 0,15-0,30	0,035	0,030
AE 24	0,025-0,060	1,3-2,5	0,25-0,65	18,5-20,5	9,0-11,0	12.(%C), max. 1,2	0,025	0,018

### Chromniklové austenitické oceli s přísadou molybdenu

Odolnost chromnikloých austenitických ocelí proti korozi v aktivním i pasivním stavu zvyšuje molybden, protože se hromadí v ochranné povrchové vrstvičce.

Chemické složení ocelí zařazených ve třídě 17 je uvedeno v příloze 1. Tabulka 21 uvádí několik příkladů těchto ocelí.

**Tab. 21.** *Austenitické chromniklové oceli s přísadou molybdenu*

Značka	Chemické složení v %						
	C max.	Mn max.	Si max.	Cr	Ni	Mo	N
17 345	0,15	2,0	1,5	16,0-19,0	9,0-12,0	1,5-2,5	
17 359	0,03	2,0	1,0	16,5-18,5	11,0-13,5	2,0-2,5	0,12-0,22
42 2942	0,20	1,5	2,0	18,0-20,0	9,0-11,0	2,0-2,5	

Ocel značky 17 349 se používá například při syntéze močoviny, která probíhá za teploty 170 až 190 °C. a tlaku 15MPa. Podobné použití má ocel značky 17 350.

Chrom-nikl-molybdenové oceli se také stabilizují titanem. Kompletní přehled těchto ocelí je v příloze 1. V tabulce 22 jsou uvedeny vybrané příklady.

Při obsahu molybdenu nad 2,5% se používají na zařízení na výrobu celulózy sulfidovým způsobem a na tlakové nádoby pro teploty 400 až 550 °C. Jsou také vhodné na součástky pracující v chemickém, gumárenském a textilním průmyslu, respektive při výrobě barev. Ocel značky 17 342 má velmi nízký obsah uhlíku, takže je dobře svařitelná. Odolává bodové korozi, není však vhodná pro silně oxidační prostředí. Používá se při výrobě celulózy, papíru, textilních vláken apod.

**Tab. 22.** *Stabilizované austenitické chrom-nikl-molybdenové oceli*

Značka	Chemické složení v %							
	C max.	Mn max.	Si max.	Cr	Ni	Mo	Ti min.	Nb
17 252	0,12	1,5	1,5	19,0-22,0	36,0-40,0	4,5-6,5	4.(%C) max. 1,0	
17 342	0,03	2,0	1,0	18,0-21,0	24,0-27,0	4,0-5,5	0,20-0,50	0,30-0,60
42 2941	0,05-0,15	1,5	2,0	17,0-19,0	9,0-11,0	2,0-2,5	5.(%C-0,03) max. 0,80	

### Chromniklové austenitické oceli s přísadou molybdenu a mědi

Měď zvyšuje jako elektrotechnicky ušlechtilý prvek pasivační schopnost, takže podporuje účinek molybdenu, zejména v neoxidačních kyselinách např. ve zředěné kyselině fluorovodíkové, octové a sírové. Chemické složení našich ocelí na odlitky je uvedeno v tab. 23.

**Tab. 23.** *Austenitické chrom-nikl-molybden-měděné oceli*

ČSN	Chemické složení v %								
	C max.	Mn max.	Si max.	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti
42 2958	0,10	2	1,5	20,0-22,5	17-19	2,5-3,5	2,5-3,5	0,2-0,5	0,2-0,5
42 2956	0,20	1	1,5	20,0-22,0	37-40	4,8-5,5	2,8-3,3		

### Žáruvzdorné chromniklové austenitické oceli

Chromniklové austenitické oceli jsou vhodné na součástky pracující v prostředí, ve kterém kolísá pracovní teplota. Jejich nevýhodou je, že snášejí špatně prostředí obsahující sloučeniny síry, protože se tvoří na povrchu sulfidy, které mají nižší teplotu tání než oxidy. Chemické složení ocelí této skupiny je uvedeno v příloze 1. V následující tabulce 24 je uvedeno jen několik vybraných ocelí.

**Tab. 24.** *Chromniklové austenitické žáruvzdorné oceli*

Značka	Chemické složení v %					
	C max.	Mn max.	Si max.	Cr	Ni	jiné
17 242	0,25	2,00	1,0	17-20	8-11	
17 253	0,20	1,00	1,5	19-22	36-40	
17 322	0,40-0,50	0,7	0,8	12-15	12-15	0,2-0,4Mo 2-2,75W
42 2932	0,15-0,35	1,5	1,0-2,0	17-20	8-11	
42 2936	0,25-0,50	1,5	2,0	24-27	12-14	
42 2950	0,30-0,40	0,5	1,0-1,5	23-25	20-22	1-1,5Al 0,05-0,2Ti

Oceli značky 42 2951 a 42 2952 mají zvýšenou odolnost proti nauhličování a působení SO<sub>2</sub>.

### **3) Austenitické chrommanganové oceli s přísadou dusíku**

Spotřeba chromniklových austenitických ocelí se stále zvyšuje. Protože je nikl drahý prvek, bylo vyvinuto velké úsilí nahradit ho jiným, lacinějším prvkem. Výběr legovacích prvků je však v tomto směru omezený, protože oblast gama zcela otevírá kromě niklu pouze mangan, rozšiřují ji dusík a měď. Z četných vědeckých prací nakonec vyplynulo, že je možno postupovat dvojím způsobem:

- snížit obsah niklu na polovinu (asi na 5 %), stabilitu austenitu zvýšit přísadou manganu a dusíku. Tyto oceli se označují jako korozivzdorné austenitické oceli CRMnNiN.
- celý obsah niklu nahradit zvýšeným obsahem manganu a dusíku. Tyto oceli se nazývají oceli CrMnN.

### Chrom-mangan-nikl-dusíkové oceli

Chemické složení ocelí této skupiny je uvedeno v tab. 25.



**Tab. 25.** *Chemické složení austenitických ocelí CrMnNiN*

Značka	Chemické složení v %							
	C max.	Mn	Si max.	Cr	Ni	Mo max.	Cu max.	N
17 460	0,12	7,0-10,0	0,9	17,0-20	4-6,0			0,10-0,25
Na odlitky	0,15	7,5-15,0	1,2	17,5-20	4-5,5	1	1	0,10-0,25

Chrom-mangan-dusíkové oceli

U ocelí této skupiny se pohybuje obsah manganu mezi 14 až 17% (tab. 26). Protože vysoký obsah manganu způsobuje těžkosti při odlévání, taví se oceli této skupiny jen zřídka.

**Tab. 26.** *Chemické složení austenitických ocelí CrMnN*

	Chemické složení v %							
	C	Mn	Si	Ni	Mo	Cu	N	Cr
17 471	0,05-0,12	14,0-17,0	0,60-1,50	1,20-2,20			0,32-0,42	16-19
17 465	0,48-0,58	8,0-10,0	max. 0,45		3,25-1,50		0,30-0,55	20-22
Na odlitky	max. 0,18	14,5-16,0	max. 1,2	max. 2,0	0,30-0,50	0,30-0,50	0,18-0,30	16-19

Ocel 17 465 odolává žáru do teploty 900 °C.

Oceli CrMnNiN a CrMnN se používají zejména v potravinářském průmyslu, ve strojírenství a při výrobě spotřebního zboží.

**4) Vytvrditelné feriticko-austenitické korozi-vzdorné oceli**

Oceli této skupiny mají po rozpouštěcím žhánání a rychlém ochlazení feriticko-austenitickou maticí. Tvrdost, a tím i zvýšenou odolnost proti opotřebení, získávají precipitačním vytvrzováním. Oceli této skupiny jsou uvedeny v příloze 1. V následující tabulce 27 jsou vybrané příklady.

**Tab. 27.** *Chemické složení korozi-vzdorných vytvrditelných ocelí*

Značka	Chemické složení v %							
	C max.	Mn	Si	Cr	Ni	Mo max.	Cu max.	Jiné
K2	0,04	max. 1,0	max. 1,0	25,0-27,0	4,75-6,0	1,75-2,25	2,75-3,25	
17 351	0,08	0,3-0,8	max. 0,9	15,5-17,0	5,6-7,0			max. 1Al, 0,5-1Ti
AKHM	0,02	10,5	10,5	10,0				2,5 Al, 1,0 Ti
0CH20N9M4S3-L	0,06	3,5	20,0	9,0	4,0			

**D. Oceli pro speciální použití**

- Svařitelné oceli s vyšší mezí kluzu
- Oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi
- Oceli pro chemicko-tepelné zpracování
- Pružinové oceli
- Oceli na povrchové kalení

- Oceli na valivá ložiska
- Oceli se zvýšenou odolností proti vodíkové korozi
- Žáropevné oceli
- Oceli pro záporné teploty
- Oceli o vysoké pevnosti
- Oceli se zvýšenou odolností proti abverzivnímu opotřebení

### Ø Svařitelné oceli s vyšší mezí kluzu

Oceli zařazené v této skupině mají vyšší mez kluzu než svařitelné oceli tř. 11 obvyklé jakosti, což umožňuje snížit hmotnost svařovaných konstrukcí a součástek. Protože se přitom zachovávají dobré plastické vlastnosti, tvárnost zastudena, odolnost proti křehkému lomu a dostatečně nízkou přechodovou teplotou, jsou vhodné na mostní konstrukce, trubky pro dálkovou dopravu tekutého i plynného paliva, ramena rýpadel, konstrukce chladících zařízení, dynamicky namáhaných částí podvozků kolejových vozidel apod. V automobilovém průmyslu přináší použití těchto ocelí snížení hmotnosti. Příklad těchto ocelí je uveden v tabulce 28. Ostatní oceli této skupiny lze najít v příloze 1.

**Tab. 28.** *Svařitelné bainitické oceli s nízkým obsahem uhlíku*

Ocel	Chemické složení v %								
	C	Mn	Si	N	Al	Mo	Nb	B	Ti
2 MnMoNb	0,03	2,10	0,10	0,008	0,020	0,33	0,12		
2 MnMoNbB	0,02	2,47	0,17	0,005	0,013	0,33	0,12	0,003	
2 MnMoNbTiB	0,03	2,10	0,15	0,006	0,057	0,23	0,09	0,002	0,04

### Oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi

Aby se vnější konstrukce nemusely natírat ochrannými nátěry, byly vyvinuty nízkolegované oceli, na jejichž povrchu se tvoří za působení atmosféry za dva až tři roky ochranná tmavohnědá až fialová vrstvička rzi (patiny), která další korozi velmi zpomalí. Chemické složení těchto ocelí je uvedeno v následující tabulce 29 a také v příloze 1.

**Tab. 29.** *Oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi*

ČSN	Značka	Chemické složení v %									
		C max.	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Nb	V	Al r.k. min.	P max.
15 117	ATMOFIX 37	0,12	0,20-0,55	0,10-0,35	0,30-0,60	0,20-0,40	0,30-0,50			0,02	0,045
15 127	ATMOFIX 52 B	0,10-0,17	0,90-1,20	0,20-0,45	0,40-0,80	0,30-0,60	0,30-0,50	0,02-0,06	0,02-0,06	0,01	0,040
15 217	ATMOFIX 52 A	0,12	0,30-1,00	0,25-0,75	0,50-1,25	0,30-0,60	0,30-0,50			0,01	0,06-0,15

### Oceli na chemicko-tepelné zpracování

#### Cementační oceli

Při cementování se tvoří na povrchu součástek vrstva se slabě nadeutektoidním obsahem uhlíku, která je po zakalení tvrdá, takže součástky mají vysokou odolnost proti opotřebení a vyšší mez únavy.

Nízkolegované oceli se používají pouze na málo namáhané součástky s menší tloušťkou stěny. Kompletní přehled těchto ocelí je uveden v příloze 1. V následující tabulce 30 jsou uvedeny příklady.

**Tab. 30.** *Cementační oceli*

Značka	Chemické složení v %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti		P max.	S max.
12 010	0,07-0,14	0,35-0,65	0,17-0,37	max. 0,15				0,040	0,040
14 120	0,12-0,18	0,40-0,70	0,17-0,37	0,70-1,00				0,035	0,035
14 223	0,17-0,23	0,80-1,10	0,17-0,37	1,00-1,30		0,04-0,10		0,035	0,035
16 520	0,10-0,17	0,30-0,60	0,15-0,35	0,90-1,30	3,90-4,70		W	0,040	0,035
16 720	0,14-0,21	0,25-0,55	0,17-0,37	1,35-1,65	4,00-4,50		0,80-1,20	0,035	0,035

#### Nitridační oceli

Nitridační oceli se legují chromem, hliníkem, vanadem a molybdenem. Chemické složení těchto ocelí je uvedeno v příloze 1. Tabulka 31 uvádí několik příkladů.

**Tab. 31.** *Oceli na nitridování*

Značka	Chemické složení v %								
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Al	P max.	S max.
14 340	0,28-0,38	0,50-0,90	0,17-0,37	1,30-1,90			0,90-1,30	0,035	0,035
15 330	0,24-0,34	0,40-0,80	0,17-0,37	2,30-2,70	0,20-0,30	0,15-0,30		0,035	0,035

#### Nitrocementační oceli

K nitrocementování jsou vhodné nízkolegované oceli. Obvykle se používají oceli třídy 14. Používají se oceli legované manganem, chromem, vanadem a molybdenem. Chemické složení nitrocementačních ocelí je uvedeno v příloze 1. V tabulce 32 je uvedeno několik příkladů těchto ocelí.

**Tab. 32.** *Oceli na nitrocementování*

Značka	Chemické složení v %									
	C	Mn	Si	Cr	Ni max.	Ti	V	P max.	S max.	
14 221	0,17-0,22	1,00-1,30	0,17-0,37	1,00-1,30				0,035	0,035	B
14230	0,28-0,35	0,90-1,20	max. 0,35	0,80-1,00				0,035	0,035	0,001-0,005
15 241	0,35-0,43	0,60-0,80	0,17-0,37	1,70-2,00	0,60		0,10-0,20	0,035	0,035	

### Pružinové oceli

Protože jsou pružiny namáhány střídavým zatížením, požaduje se vysoká mez pružnosti, kluzu a únavy. Současně však musí být ocel houževnatá, aby pružiny snášely dynamické zatížení a plastické deformace při výrobě (stáčení).

Na výrobu pružin se používají ušlechtilé oceli nelegované, nízkolegované a vysokolegované. Nelegované oceli jsou vhodné na méně namáhané pružiny pracující za normální teploty.

Namáhané pružiny respektive pružiny o větších průřezích se vyrábějí z nízkolegovaných manganových, křemíkových, mangankřemíkových, chromkřemíkových, manganchromových a chromvanadových ocelí.

Ocel 14 182 byla vyvinuta na velmi namáhané pružiny. Z oceli značky 14 260 se vyrábějí pružnice, pera a pružiny staticky a dynamicky namáhané, stejně jako talířové pružiny, hnací spirálové pružiny apod. Lze ji použít až do teploty 300°C, ale také na záporné teploty. Na dráty nejvíce namáhaných pružin byly vyvinuty oceli 65 V a 53 CrV. Chemické složení ocelí na pružiny je kompletně uvedeno v příloze 1. Tabulka 33 uvádí pouze několik příkladů.

**Tab. 33.** *Nelegované a legované oceli na pružiny*

Značka	Chemické složení v %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni max.	Cu max.	V	P max.	S max.
12 041	0,37- 0,45	0,50- 0,80	0,17- 0,37	max. 0,25	0,30	0,30		0,035	0,035
13 180	0,70- 0,80	0,90- 1,20	0,15- 0,35	max. 0,30	0,40	0,30		0,035	0,040
14 160	0,50- 0,80	0,70- 1,00	0,30- 0,50	0,30- 0,50	0,40	0,30		0,040	0,040
15 260	0,47- 0,55	0,70- 1,00	0,17- 0,37	0,90- 1,20			0,10- 0,20	0,035	0,035
17 023	0,26- 0,35	max. 0,80	max. 0,70	12,0- 14,0				0,040	0,030
53 CrV	0,47- 0,55	0,30- 0,60	0,15- 0,30	0,75- 1,10			0,15- 0,25	0,030	0,030

### Oceli na povrchové kalení

Povrchové kalení se provádí plamenem nebo indukčně. Podle požadované tloušťky zakalené vrstvy a pevnosti jádra se používají oceli nelegované nebo nízkolegované. Oceli doporučené pro povrchové kalení jsou uvedeny v příloze 1. V následující tabulce 34 jsou uvedeny příklady těchto ocelí a jejich chemické složení.

**Tab. 34.** *Oceli doporučené na povrchové kalení*

Značka	Chemické složení v %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu max.	jiné	P max.	S max.
12 040	0,32-0,40	0,50-0,80	0,17-0,37	max. 0,25	max. 0,30	0,30		0,040	0,040
14 140	0,35-0,42	0,50-0,80	0,17-0,37	0,80-1,10				0,035	0,035
15 142	0,38-0,45	0,50-0,80	0,17-0,37	0,90-1,20			0,15-0,30	0,035	0,035
16 440	0,30-0,40	0,40-0,80	0,17-0,37	0,60-1,00	3,20-3,70			0,035	0,035
42 2660	0,40-0,50	0,40-0,80	0,20-0,50				Mo	0,035	0,035
NiCrMo80	0,30-0,36	0,70-1,00	0,20-0,40	1,00-1,30	1,30-1,60		0,20-0,30	0,020	0,020

**Oceli na valivá ložiska**

Základní požadavky na vlastnosti ložiskových ocelí je možno shrnout:

- matrice musí mít tvrdost 61 až 65 HRC
- ložisko musí mít vysokou mez únavy při kontaktním namáhání po dobu několika tisíc hodin
- ocel musí mít vysokou mez kluzu, pevnost a dostatečnou houževnatost
- v matrici musí být minimální obsah lidských vměstků
- karbidická fáze musí být rozložena v matrici rovnoměrně
- v dodaném materiálu nesmí být vnitřní vady

V technické praxi jsou valivá ložiska obvykle příliš dynamicky namáhána, takže se na jejich výrobu používají poměrně křehké vysokouhlíkové nízkolegované chromové nebo chrommanganové oceli, které se kalí a popouštějí za nízkých teplot. V tabulce 35 je uvedeno několik příkladů těchto ocelí a kompletní přehled je uveden v příloze 1.

**Tab. 35.** *Chemické složení ocelí na valivá ložiska*

Značka	Chemické složení v %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni max.	Cu max.		Mo	W
14 109	0,90-1,10	0,30-0,50	0,15-0,35	1,30-1,65	0,30	0,25			
52 100 C	0,95-1,10	0,65-0,90	0,20-0,35	1,10-1,50	0,25	0,35		0,20-0,30	
17 042	0,90-1,05	max. 0,90	max. 0,70	16,0-18,0					
X105CrMo17	0,95-1,20	max. 1,00	max. 1,00	16,0-18,0			V	0,40-0,80	
19 802	0,80-0,90	max. 0,45	max. 0,45	3,80-4,60			2,00-2,70	max. 0,50	9,50-11,00

### **Oceli se zvýšenou odolností proti vodíkové korozi**

Hlavním legovacím prvkem těchto ocelí je chrom, jehož obsah je až 10% podle toho, pro jaké pracovní teploty a tlaky jsou oceli určeny. Příklad našich ocelí se zvýšenou odolností proti vodíkové korozi je uveden v tabulce 36. Kompletní přehled je uveden v příloze 1.

**Tab. 36.** *Oceli se zvýšenou odolností proti vodíkové korozi*

Značka	Chemické složení v %								
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni max.	P max.	S max.
15 421	0,18-0,28	0,50-0,80	0,15-0,40	2,70-3,50	0,25-0,60		0,80	0,040	0,040
15 423	0,17-0,23	0,30-0,50	0,20-0,35	3,00-3,50	0,50-0,65	0,45-0,60		0,035	0,035
17 102	max. 0,15	max. 0,60	max. 0,50	4,00-6,00	0,45-0,65			0,035	0,030

Ocel značky 17 102 je vhodná na součástky používané při zpracování ropy resp. Stlačeného vodíku do teploty 600°C. Ocel značky 17 116 má zvýšený obsah chromu. Používá se jako žárovečná ocel, odolá však také korozi v oxidačním prostředí do teploty 625°C. Je vhodná na součástky pracující v prostředí s vysokou koncentrací sirovodíku.

### **Žárovečné oceli**

Žárovečné oceli se používají v energetice i v chemickém průmyslu při syntéze čpavku, při výrobě dehtu, syntetických pohonných látek tj. všude tam, kde se pracuje za teploty až 600°C a tlaku až 1000MPa. Žárovečné oceli používané v technické praxi lze rozdělit podle chemického složení na:

- nelegované oceli
- nízkolegované oceli
- vysokolegované chromové oceli
- austenitické oceli
- vytvrditelné oceli

Přehled těchto ocelí včetně jejich chemického složení je uveden v příloze 1.

### **Oceli pro záporné teploty**

Oceli pro záporné teploty musí mít dostatečně vysokou pevnost a mez kluzu, požaduje se však také vrubová houževnatost a odolnost proti křehkému lomu. Dále se požaduje nízká tepelná vodivost, nízká roztažnost. Teploty do -150°C se dnes označují jako nízké a teploty pod -150°C jako kryogenní. Někdy se také žádá odolnost proti korozi a dobrá svařitelnost. Používané oceli lze rozdělit na:

- nelegované
- nízkolegované
- vysokolegované niklové
- martenzitické korozivzdorné typu 13/4 a 13/6
- austenitické chromniklové
- austenitické manganchromové

V následující tabulce 37 je uvedeno několik příkladů těchto ocelí. Kompletní přehled lze nalézt v příloze 1.

**Tab. 37.** *Oceli pro nízké teploty*

Značka	Chemické složení v %										Teplota (°C)
	C	Mn	Si	Cr max.	Ni	Cu max.	P max.	S max.	Jiné	Al kov.	
11 369	max. 0,14	max. 0,80	max. 0,35	0,30	max. 0,30	0,30	0,040	0,040	1	min. 0,02	-50
13 221	0,15-0,20	1,40-1,70	0,20-0,50	0,30	0,40-0,60	0,30	0,030	0,030	V 0,10-0,20	0,015-0,070	-40
16 222	max. 0,18	1,00-1,50	max. 0,35	0,30	0,70-1,10	0,30	0,040	0,040	Nb 0,04-0,08	min. 0,010	-70
16 320	0,10-0,17	0,30-0,60	0,15-0,35		2,80-3,30		0,035	0,035			-150

1 .. vyrábí se také s přísadou 0,02-0,05% Nb nebo V

2 .. ocel na výkovky s přísadou max. 0,08% Nb

### **Oceli s vysokou pevností**

U těchto ocelí se kromě vysoké pevnosti v tahu musí věnovat pozornost dalším vlastnostem, jako jsou plastické vlastnosti, někdy je třeba zaručit mez únavy, mechanické vlastnosti při záporných teplotách, odolnost proti korozi a podobně. Podle chemického složení lze tyto oceli rozdělit na :

- § nízkolegované zušlechtitelné
- § nízkolegované martenzitické vytvrditelné
- § chromové a chromniklové korozivzdorné
- § TRIP oceli

Přehled těchto ocelí je uveden v příloze 1. V tabulce 38 je uvedeno několik příkladů.

**Tab. 38** *Chemické složení tvářených nízkolegovaných ocelí s vysokou pevností*

Značka	Chemické složení v %						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
30 CHGSA	0,30	0,95	1,05	0,95			
Super trident	0,55	0,80	2,10	0,90	3,60	0,50	
39 Ni2Cr	0,33-0,43	0,70-1,20	0,90-1,20	0,80-1,10	1,40-1,70	0,20-0,30	min. 0,05
15 241	0,35-0,43	0,60-0,80	0,17-0,37	1,70-2,00			0,10-0,20
16 341	0,35-0,43	0,60-0,80	0,17-0,37	0,80-1,20	1,60-2,10	0,10-0,20	

### **Oceli se zvýšenou odolností proti abrazivnímu opotřebení**

Abrazivní opotřebení lze definovat jako trvalou nežádoucí změnu povrchu tělesa, způsobenou působením funkčního povrchu a abrazivního média, projevující se rýhováním a odřezáváním částic exponovaného tělesa.

Toto opotřebení se objevuje na povrchu součástí např. při mletí a drcení tvrdých surovin, na zubech bagrovacích lžic apod.

Přehled těchto ocelí je uveden v tabulkách 39 a 40.

**Tab. 39.** *Nízkolegované oceli se zvýšenou odolností proti abrazivnímu opotřebení*

Značka	Chemické složení v %						
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V
42 2711	0,65-0,80	1,10-1,60	0,20-0,50				
42 2735	0,50-0,65	0,90-1,30	0,20-0,50	0,90-1,30			
42 2736	0,60-0,75	0,80-1,20	0,20-0,50	1,80-2,20			
42 2739	0,45-0,60	0,50-0,90	0,20-0,50	0,60-0,90			
42 2753	0,70-0,85	0,60-0,90	0,20-0,50	1,30-1,70	0,50-0,80	0,40-0,60	0,10-0,25
14 281	0,70-0,80	1,00-1,50	0,20-0,35	0,70-1,00			

**Tab. 40.** *Austenitické manganové oceli*

Značka	Chemické složení v %					
	C	Mn	Si max.	P max.	S max.	Cr
17 618	1,10-1,40	11,0-13,0	1,00	0,10	0,040	
42 2920	1,10-1,50	12,0-14,0	0,70	0,10	0,050	
42 2921	1,10-1,50	12,0-14,0	0,70	0,10	0,050	0,70-1,20

Podrobnější popis jednotlivých typů ocelí lze vyhledat v literatuře [1].



## 2 Magnetické vlastnosti látek a materiálů

Magnetické vlastnosti materiálů a látek posuzujeme podle toho, jak se daná látka či materiál chová ve vnějším magnetickém poli, do kterého je umístěna. Daný materiál vykazuje ve vnějším magnetickém poli jednu ze základních magnetických vlastností:

- a) diamagnetismus
- b) paramagnetismus
- c) feromagnetismus

Podle toho, která z uvedených magnetických vlastností u daného materiálu nebo látky převažuje, můžeme potom látku označit za diamagnetickou, paramagnetickou, nebo feromagnetickou. Látky diamagnetické a paramagnetické patří do skupiny látek slabě magnetických, a materiály feromagnetické do skupiny silně magnetických.

Obecně je magnetické pole v určitém bodě prostoru popsáno dvěma určujícími vektory:

Intenzitou magnetického pole  $\vec{H}$  [A/m]

Magnetickou indukcí  $\vec{B}$  [T]

Vzájemný vztah, daný mezi těmito veličinami, pak rozhoduje o tom, do které magnetické skupiny daná látka patří a jednoznačně ji magneticky popisuje.

Tato závislost je vyjádřena pomocí obecně známé materiálové rovnice:

$$\vec{B} = f(\vec{H}) = m \cdot \vec{H} = \mu_r \mu_0 \cdot \vec{H} \quad [\text{T}; -, \text{Hm}^{-1}, \text{Am}^{-1}] \quad (1)$$

kde značí:  $\mu_0$  – permeabilitu vakua ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ )  
 $\mu_r$  – relativní permeabilitu  
 $\mu$  – absolutní permeabilitu prostředí

Za jednotkové prostředí pro posuzování magnetických vlastností je považováno vakuum. Pro přesnější posuzování magnetických vlastností některých materiálů je dále vhodné rozdělit výslednou složku magnetické indukce v daném vzorku na složku indukce způsobenou samotnou látkou a složku indukce připadající na magneticky všude přítomný nadprostor vakua.

Označíme-li tyto složky:  $\vec{B}_0$  - magnetická indukce vakua [T]

$\vec{B}_m$  - magnetická indukce vlastní látky, materiálu [T]

Potom pro výslednou složku magnetické indukce v daném vzorku platí:  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m$  [T] (2)

Velikost relativní permeability je potom dána: 
$$m_r = \frac{\vec{B}}{\vec{B}_0} = 1 + \frac{\vec{B}_m}{\vec{B}_0} \quad (3)$$

Dále pro podrobnější popis zavádíme:

Vektor magnetizace: 
$$\vec{M} = \frac{\vec{B}}{m_0} - \vec{H} \quad [\text{A/m}] \quad (4)$$

(složka intenzity magnetického pole ve vzorku způsobená jeho vlastními magnetickými vlastnostmi)

Vektor polarizace: 
$$\vec{J} = \vec{B} - m_0 \vec{H} \quad [\text{T}] \quad (5)$$

(složka magnetické indukce vyvolaná ve vzorku jeho vlastními magnetickými vlastnostmi)

Magnetickou susceptibilitu: 
$$k = m_r - 1 = \frac{\vec{B}_m}{\vec{B}_0} \quad (6)$$

A dále platí: 
$$\begin{aligned} \vec{J} &= \vec{B} - m_0 \vec{H} = (m_r - 1)m_0 \vec{H} = km_0 \vec{H} \\ \vec{B} &= m_0 \vec{H} + \vec{J} = m_0 \vec{H} + m_0 k \vec{H} \end{aligned} \quad (7)$$

Z uvedeného přehledu závislostí jednotlivých magnetických veličin je patrné, že základními parametry určující magnetické vlastnosti materiálů jsou:

**μ – magnetická permeabilita**

**κ – magnetická susceptibilita**

Podle velikosti hodnot případně funkčních závislostí, jenž tyto parametry nabývají, pro určité materiály zařazujeme pak dané materiály do příslušné magnetické skupiny (para, dia, fero). V následující tabulce je uveden krátký přehled charakteristických vlastností těchto materiálů.

**Tab. 41.** *Rozdělení magnetických materiálů*

materiál	diamagnetický	paramagnetický	feromagnetický
Relativní permeabilita	$\mu_{\text{dia}} < 1$	$\mu_{\text{para}} > 1$	$\mu_{\text{fero}} \gg 1$ ; $\mu_{\text{fero}} = f(H)$
Relativní susceptibilita	$\kappa_{\text{dia}} < 0$	$\kappa_{\text{para}} > 0$	$\kappa_{\text{fero}} \gg 0$ ; $\kappa_{\text{fero}} = f(H)$

V této a následující kapitole bylo čerpáno z literatury [2], [4], [5], [6].

## 2.1 Popis jednotlivých typů materiálů

Abychom si lépe představili rozdíl mezi materiály diamagnetickými, paramagnetickými a feromagnetickými, uvedeme si charakteristické vlastnosti těchto materiálů, včetně jejich představitelů.

### A) Látky Diamagnetické

#### Charakteristické vlastnosti:

Relativní permeabilita:  $\mu_{\text{dia}} < 1$ ; Relativní susceptibilita:  $\kappa_{\text{dia}} < 0$

- Těleso z diamagnetické látky je v nehomogenním magnetickém poli vytlačováno z míst o vyšší intenzitě pole do míst s nižší intenzitou pole.
- Výsledný magnetický moment diamagnetické látky je orientován opačně ke směru magnetického pole, proto se i vektor magnetizace orientuje antiparalelně vzhledem k vektoru intenzity pole.
- Susceptibilita diamagnetik nezávisí na teplotě.
- Susceptibilita diamagnetik nezávisí na vnějším magnetickém poli.
- Susceptibilita diamagnetik se pohybuje řádově ( $-10^{-6}$  až  $-10^{-4}$ ).

#### Představitelé:

- Všechny inertní plyny
- Velký počet kovů (měď, stříbro, berylium, zinek, rtuť, germanium, olovo, vizmut a selen)
- Některé nekovy (křemík, fosfor, síra)
- Organické látky
- Dusík, voda
- Dokonalá diamagnetika – supravodiče

### B) Látky paramagnetické

#### Charakteristické vlastnosti:

Relativní permeabilita:  $\mu_{\text{para}} > 1$ ; Relativní susceptibilita:  $\kappa_{\text{para}} > 0$

- Paramagnetická látka je v nehomogenním poli vtahována z míst s nižší intenzitou do míst s intenzitou vyšší.
- Magnetický moment paramagnetika i magnetizace je orientován paralelně se směrem vnějšího magnetického pole.
- Susceptibilita paramagnetik je nezávislá na intenzitě  $H$ , ale její velikost je závislá na teplotě.
- Susceptibilita paramagnetik se pohybuje řádově ( $10^{-5}$  až  $10^{-4}$ ).

#### Představitelé:

- některé plyny (kyslík)
- některé kovy (mangan, chrom, platina, tantal, wolfram, hliník)
- velké množství solí, zvláště feromagnetických prvků
- vzácné zeminy (dysprosium)
- alkalické kovy (lithium, sodík, draslík)

### C) Látky feromagnetické

#### Charakteristické vlastnosti:

Relativní permeabilita:  $\mu_{\text{fero}} \gg 1$ ; Relativní susceptibilita:  $\kappa_{\text{fero}} \gg 0$

- V nepřítomnosti vnějšího magnetického pole mají magnetický moment různý od nuly.
- Magnetizace s rostoucí teplotou klesá, průběh poklesu magnetizace se od paramagnetik liší, rozdílná je i závislost magnetizace na intenzitě magnetického pole. Rozdílnost teplotního průběhu magnetizace a závislost na vnějším poli je podmíněna doménovou strukturou a existencí spontánní magnetizace

#### Základní rysy:

- Feromagnetika dosahují snadno nasycení a to v polích snadno vyrobitelných.
- Vyznačují se nesrovnatelně vyšší magnetizací ve slabých polích než látky paramagnetické.
- Magnetizace feromagnetik není lineární funkcí intenzity pole, jako u látek paramagnetických, a proto jsou zde i hodnoty  $\mu$  a  $\kappa$  funkcí pole.
- Magnetizace nezávisí pouze na hodnotě intenzity právě působící na látku, ale podstatný vliv na ni mají i předchozí magnetizační procesy.
- Při teplotě vyšší než je teplota Curieova, feromagnetismus zaniká a látka se dále chová jako látka paramagnetická.
- Feromagnetický stav je převážně vázán na látky s pevnou stavbou, pravidelným uspořádáním a na látkách tvořících krystalové mřížky.

#### Představitelé:

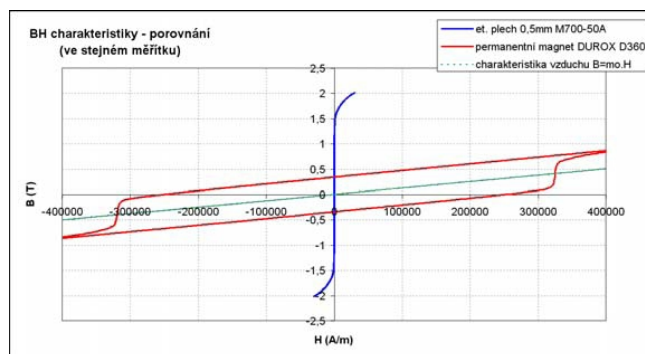
- železo, kobalt, nikl, gadolinium
- velké množství slitin a sloučenin složených z prvků feromagnetických i neferomagnetických.

Podle výsledných parametrů popisujících jejich chování v magnetickém poli dělíme feromagnetické materiály do dvou základních skupin:

**Magneticky tvrdá feromagnetika** (permanentní magnety)

**Magneticky měkká feromagnetika** (konstrukční oceli, elektrotechnické plechy, atd.)

Pro názornost a vyjádření, jak dalece se mohou lišit magnetické vlastnosti těchto skupin feromagnetik, je uvedeno porovnání na následujícím obrázku, kde jsou uvedeny magnetické vlastnosti konkrétních materiálů pro jeden materiál magneticky měkký a jeden magneticky tvrdý.



obr.č.2 Porovnání magnetických vlastností magneticky měkkého a magneticky tvrdého feromagnetika

## 2.2 Feromagnetické materiály

### a) Magneticky tvrdá feromagnetika:

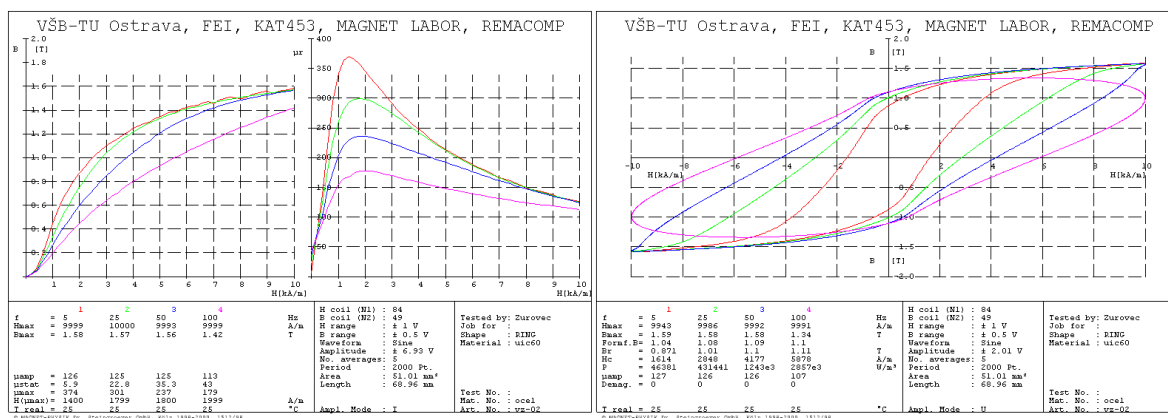
Základní parametry popisující feromagneticky tvrdé materiály jsou  $B=f(H)$  a  $J=f(H)$  charakteristiky, nebo se z těchto charakteristik dále určují. U magneticky tvrdých materiálů je stěžejní druhý kvadrant, obsahující tzv. demagnetizační charakteristiku. Tyto charakteristiky je možno uvádět ve tvaru  $B=f(H)$  jakožto velikost magnetické indukce v závislosti na intenzitě pole, nebo ve tvaru  $J=f(H)$  jakožto magnetická polarizace v závislosti na intenzitě pole. Tato druhá charakteristika je u permanentních magnetů udávána častěji, neboť jsou z ní jasněji vidět magnetické vlastnosti samotného materiálu magnetu. Z těchto charakteristik lze pak následně určit další stěžejní parametry popisující magnetické vlastnosti materiálů.

Charakteristické parametry :

- koercitivní síla  $H_cJ$ ,  $H_cB$  (A/m)
- remanentní magnetizace  $B_r$  (T)
- maximální energetický součin  $BH_{\max}$  (kJ/m<sup>3</sup>, W/m<sup>3</sup>)

### b) Magneticky měkká feromagnetika:

Základní parametry popisující feromagneticky měkké materiály jsou dány charakteristikami uvedenými na obr.č.2, nebo se z těchto charakteristik dále určují. Pro aplikace a návrhy zařízení je převážně nejdůležitější první kvadrant těchto charakteristik, obsahující magnetizační charakteristiku.



obr.č.3 Základní charakteristiky feromagneticky měkkého materiálu

a) amplitudové magnetizační křivky a křivky relativní permeability ( $f=5, 25, 50, 100$  Hz)

b) hysterezní BH charakteristiky pro různé frekvence budícího pole ( $f=5, 25, 50, 100$  Hz)

Charakteristické křivky:

§ **magnetizační křivky**

(prvotní nebo amplitudové, statické nebo pro definovanou frekvenci budícího pole, rovněž je důležité zvažovat tvar signálu budícího pole)

§ **křivky relativní permeability**

(závislost  $\mu_r=f(H)$ , určená z BH nebo magnetizační charakteristiky)

§ **amplitudové BH charakteristiky**

(určené statickým magnetováním nebo pro definovanou frekvenci a tvar budícího pole)

Z těchto charakteristik lze následně získat další důležité parametry popisující daný materiál, mezi které například patří následující parametry:

Charakteristické parametry:

- statická relativní permeabilita ( $\mu_r$ )
- počáteční relativní permeabilita ( $\mu_{poč}$ )
- maximální relativní permeabilita ( $\mu_{max}$ )
- reverzibilní relativní permeabilita ( $\mu_{rev}$ )
- koercitivní síla  $H_C$  (A/m)
- remanentní magnetizace  $B_r$  (T)
- hysteretní ztráty  $p$  (W/m<sup>3</sup>, W/kg)

a další.

Podrobnější popis a rozbor jednotlivých parametrů případně dalších specifických vlastností lze nalézt v literatuře [2], [3], [4], [5], [6] .

## 2.3 Měření magnetických vlastností látek a materiálů

Existuje řada měřících metod a technik uzpůsobených pro zjišťování magnetických vlastností určitého typu látek a materiálů tak, aby se minimalizovaly chyby metod měření a vlivy okolí.

Základní rozdělení měřících metod, určených pro zjišťování magnetických vlastností látek a materiálů lze rozdělit podle vlastního principu měření takto:

Základní členění metod pro zjišťování magnetických vlastností látek a materiálů

Měření slabě magnetických látek (diamagnetické a paramagnetické látky)	Měření silně magnetických látek (Fero a feri magnetické látky)
a) Základní - Faradayova metoda - Curie-Chéneveauovy torzní váhy - Goudo- Pascalové váhy - Mohr-Westphalové váhy - Rankineova metoda b) Rotační metody c) Metody založené na magnetické rezonanci - Elektronové paramagnetická rezonance (EPR) - Jaderná paramagnetická rezonance (NMR)	a) magneticky měkkých materiálů b) magneticky tvrdých materiálů  a) měření na otevřených vzorcích - ve vzduchové cívice - pomocí jha b) měření na uzavřených vzorcích - toroidní vzorky - rámcové vzorky - Epsteinovo uspořádání (rámce) (další tvary s konstantním průřezem a definovatelnou střední siločarou) a) měření ve stacionárních mag. polích b) měření v dynamických mag. Polích

Vzhledem ke skutečnosti, že konstrukční oceli patří do oblasti feromagnetických materiálů, se dále budeme zabývat pouze metodami měření této skupiny materiálů.

Podrobnější přehled a popisy metod lze nalézt v literaturách [2], [3], [5].

### Měření feromagnetických materiálů

Čerpáno z literatury [2], [3].

Většinu základních parametrů feromagnetických materiálů lze určit z magnetovací charakteristiky, tedy závislosti  $B=f(H)$ .

Zatímco určení okamžité hodnoty intenzity magnetického pole nepřináší zpravidla větší problémy, jsme u zjišťování magnetické indukce nejčastěji odkázáni na využití 2. Maxwellovy rovnice.

V případě homogenních uzavřených vzorků s definovanou délkou siločáry lze intenzitu magnetického pole vypočítat přímo z magnetovacího proudu. Tečná složka intenzity se mění na rozhraní spojitě, a proto informaci o její hodnotě ve feromagnetiku můžeme získat měřením na povrchu. To se nejčastěji provádí pomocí měřiče intenzity s Hallovou sondou, v úvahu však připadají

všechny metody měření magnetických polí ve vzduchu, které splňují podmínku měření těsně při povrchu. Přímé určení statické hodnoty magnetické indukce je pouze výjimkou. A indukce uvnitř feromagnetika (resp. tok) je přístupná pouze svým vnějším projevem vyvolaným její změnou.

Platí:

$$u_i = \frac{d\Phi_c}{dt} \Rightarrow \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi_c = \Phi_2 - \Phi_1 = \Delta\Phi_c = \int_{t_1}^{t_2} u_i dt \quad (8)$$

kde  $u_i$  je napětí indukované v měřicí cívce (V),  
 $\Phi_c = N\Phi$  tok spřažený s měřicí cívkou (Wb),  
 $t_2 - t_1$  doba trvání změny toku (doba trvání napěťového impulsu) (s)

Za předpokladu že celý magnetický tok prochází měřicí cívkou navinutou těsně na vzorku, lze pro  $N$  závitů měřicího vinutí a průřezu vzorku  $S$  vyjádřit:

$$\Delta B = \frac{1}{N \cdot S} \cdot \Delta\Phi_c = \frac{1}{N \cdot S} \cdot \int_{t_1}^{t_2} u_i(t) dt \quad (9)$$

Odtud je zřejmé, že integrace indukovaných napětí je pro určení magnetické indukce nebo toku nezbytná. Integrační přístroje jsou v magnetických měřeních nazývány fluxmetry.

### 2.3.1 Měření na uzavřených vzorcích

V této podkapitole bylo čerpáno z literatury [2], [3], [5].

Uzavřený vzorek tvoří uzavřený magnetický obvod. Je-li obvod homogenní a vinutí je rozloženo rovnoměrně, lze vyloučit rozptylové toky a dosáhnout homogenního pole  $H_z$  ve vzorku. Uzavřené vzorky jsou rovněž málo citlivé na vliv vnějších magnetických polí. Vzorky s malým průřezem a vysokou permeabilitou mohou však být ovlivněny i zemským magnetickým polem. Hlavní výhodou je možnost výpočtu intenzity magnetického pole z magnetizačního proudu:

$$H(t) = \frac{F_m}{l_s} = \frac{N_1 \cdot i(t)}{l_s} \quad (\text{A/m; A, m}) \quad (10)$$

kde je  $N_1$  počet závitů magnetovacího vinutí,  
 $i(t)$  magnetovací proud,  
 $l_s$  střední délka siločáry.

$$l_s = 2 \cdot p \cdot r_s \quad (11)$$

kde  $r_s$  je střední poloměr prstence (toroidu). Přesněji řečeno je  $r_s$  poloměr, na němž leží těžiště průřezu.

Z hlediska určení střední délky siločáry  $l_s$  je nejvhodnějším tvarem vzorku prstenec – toroid. I u prstencových vzorků se mohou projevit rušivé vlivy, které porušují homogenitu vzorku:

- Nehomogenita pole při velkém rozdílu vnějšího a vnitřního průměru prstenu
- Vliv vzduchových mezer u toroidů vinutých z pásků
- Nehomogenita pole při nerovnoměrně rozloženém magnetizačním vinutí
- Parazitní kapacity magnetovacího vinutí

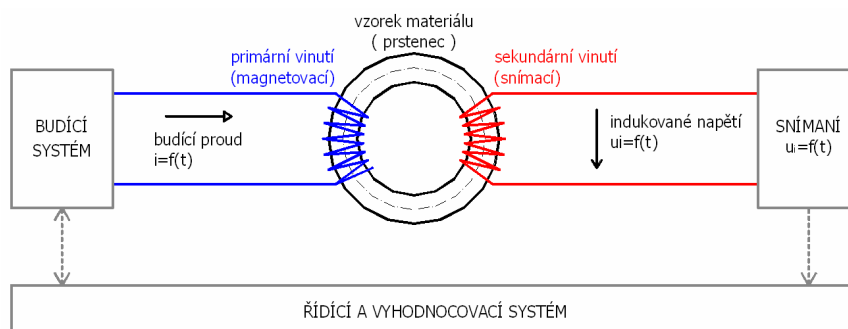


- Vliv vnějšího magnetického pole

V následujícím textu je uveden podrobnější popis metody měření na toroidu, která je nejznámější a asi i nejpropracovanější metodou.

### Metoda měření na toroidu

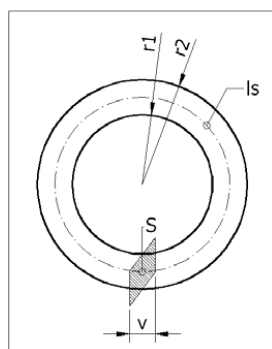
Základní schéma této metody je znázorněno na následujícím obrázku.



Obr. 4. Principiální schéma měření na toroidu

Vzorok materiálu, na kterém bude provedeno měření je vyroben ve tvaru prstence. Na něj je následně navinuto primární a sekundární vinutí. Primární vinutí slouží k magnetování vzorku (vytvoření požadované hodnoty intenzity magnetického pole  $H$  ve vzorku) a protéká jím nastavený proud. Sekundární vinutí slouží ke stanovení magnetické indukce  $B$  ve vzorku pomocí indukovaného napětí. Vzájemným porovnáním těchto parametrů v daném časovém okamžiku pak získáváme hledané magnetické vlastnosti. Většinou se jedná o  $BH$  charakteristiky a magnetovací charakteristiky, ze kterých jsou pak určovány další parametry jako je relativní permeabilita, koercitivní síla, remanentní magnetizace či velikost ztrát.

Měření budou prováděna na vzorcích prstencového tvaru s obdélníkovým průřezem a nyní si je na následujícím obrázku popíšeme.



Obr. 5. Tvar měřeného vzorku

$$l_{str} = 2 \cdot p \cdot \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (12)$$

$$S = v \cdot (r_2 - r_1) \quad (13)$$

Velikost střední siločáry je pak užita pro výpočet intenzity vzorku podle již uvedeného vztahu:

$$H_{urč} = \frac{F_m}{l_{stř}} = \frac{N_1 \cdot I_1}{l_{stř}} \quad H_{urč} - \text{určená hodnota intenzity} \quad (14)$$

Naprostě přesně by intenzita magnetického pole byla dle tohoto vztahu stanovena pouze za podmínek:

- $r_2 = r_1$  (nekonečně malý průřez vzorku)
- primární vinutí navinuto absolutně těsně a rovnoměrně na měřený vzorek (žádný rozptyl)

Prakticky ale takový vzorek vyrobit nelze. Skutečná intenzita magnetického pole ve vzorku se bude oproti námi zjištěné lišit. Pro prsten s obdélníkovým průřezem a s poloměry  $r_1$  a  $r_2$ , tedy pro náš typ vzorku je skutečná průměrná intenzita pole daná vztahem:

$$H_{sk} = \frac{1}{r_2 - r_1} \cdot \int_{r_1}^{r_2} H_{urč} dr = \frac{N_1 \cdot I_1}{2 \cdot p \cdot (r_2 - r_1)} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}$$

$$H_{sk} = N_1 \cdot I_1 \cdot \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot p \cdot (r_2 - r_1)} \quad [\text{A/m; A, m}] \quad (15)$$

Velikost chyb vznikajících při použití jednoduchého vzorce (14) udává tabulka 42.

**Tab. 42.** Chyba určení intenzity pole pro prstencový vzorek s obdélníkovým průřezem

$r_2/r_1$	1	1,2	1,5	2,0	3,0
$H_{sk}/H_{urč}$	1,000	1,003	1,014	0,040	1,098
Chyba [%]	0	-0,3	-1,4	-1,0	-9,8

V předešlé tabulce je přehledně vidět chyba, s jakou je stanovena intenzita magnetického pole podle základní určovací rovnice (y), vzhledem ke skutečné hodnotě intenzity.

Další neopomenutelný vliv na chybu měření má nepochybně nerovnoměrné rozložení magnetizačního vinutí. Nerovnoměrné rozložení magnetizačního vinutí po obvodu prstenu vyvolá rozptylové toky a tím i nehomogenitu pole vzorku. Především se toto projeví malé permeabilitě měřeného vzorku, protože obvody s velkou permeabilitou lépe soustředí magnetický tok.

Dále je také nutno dbát na dostatečný počet závitů magnetizačního vinutí. Pokud by byl počet závitů nedostatečný, projevílo by se to podobně jako nerovnoměrně rozložené vinutí po obvodu vzorku. Například je nevyhovující 5 závitů rozloženo po obvodu prstenu délky  $l_s = 100$  mm.

#### Vinutí vzorku

Na prstenu je většinou dvojí vinutí, měřicí a magnetizační. Oboje vinutí se obvykle vine přímo na vzorek. Měřicí vinutí je vždy blíže jádru, aby obepínalo co nejmenší tok vzduchem. Je důležité zajistit dobrou izolaci vinutí proti vzorku.

Magnetizační vinutí musí být po obvodu prstence rovnoměrně rozloženo v jedné nebo několika vrstvách. Po navinutí prstenu je nutné se přesvědčit, jestli nevznikly ve vinutí zkratky. Je

potřeba proměřit zda při navíjení vinutí nedošlo k vodivému spojení mezi měřicím vinutím a vzorkem a také mezi měřicím a magnetizačním vinutím. Tuto kontrolu lze jednoduše provést ohmmetrem.

Vzorek většinou musí být před měřením odmagnetován, tj. zbaven předchozího zmagnetování. K odmagnetování se většinou používá střídavého proudu síťového kmitočtu, který se zvolna a plynule snižuje od nejvyšších hodnot (odpovídající indukci v blízkosti nasycení vzorku) až k nule. Obvykle se k tomuto odmagnetování používá stejného vinutí, které je použito pro měření.

Pro magneticky měkké materiály je doporučováno odmagnetování s počáteční intenzitou pole  $H_m = 20 H_C$ .

Při praktickém měření budou magnetické vlastnosti zjišťovány jednak při měření ve stacionárním magnetickém poli a také v dynamickém magnetickém poli. Proto si tyto metody lehce nastíníme.

#### Měření ve stacionárních (stejnoseměrných) magnetických polích

Jedná se o stejnosměrné (statické) magnetování měřeného materiálu. To je tehdy, když se hodnoty indukce a intenzity magnetického pole ve vzorku nemění, nebo jsou změny tak pomalé, že další zpomalení nemá vliv na výsledky měření.

Rychlost přemagnetování ovlivňuje měřenou charakteristiku především vířivými proudy, které se při změně toku indukují v elektricky vodivém feromagnetickém materiálu a způsobují zpoždění změny toku proti změně intenzity pole. U vodivých masivních materiálů dosahují potřebné doby měření až stovky sekund.

Další zpoždění při změnách toku způsobují Barkhausenovy skoky a tzv. magnetická viskozita materiálu, která ve strmých částech magnetizační charakteristiky magneticky měkkých materiálů způsobuje velmi pomalé doznívání změn toku.

#### Měření v dynamických magnetických polích

Jedná se o střídavé magnetování, jímž rozumíme magnetovací proces, při kterém má intenzita a indukce pole periodický průběh buď bez stejnosměrné složky, nebo může být i s přeloženou stejnosměrnou složkou.

Při střídavém magnetování elektricky vodivých materiálů se indukují vířivé proudy, které způsobují povrchový jev (skinefekt). Střídavý magnetický tok je vytlačen k povrchu vzorku a ovlivní tak výsledné magnetické vlastnosti materiálů.

### 2.3.2 Měřicí systémy

K měření magnetických vlastností konstrukčních ocelí byly pořízeny dva měřicí systémy. A to systém REMACOMP – C200 a systém REMAGRAPH – C500. V následující odstavci jsou tyto systémy popsány. Tyto popisy byly převzaty ze zdroje [9].

#### 1) REMACOMP – C200

Měřicí systém je určen pro zjišťování magnetických vlastností feromagneticky měkkých konstrukčních materiálů jako jsou oceli, plechy pro elektrotechniku, ferity, atd. v dynamických magnetických polích.

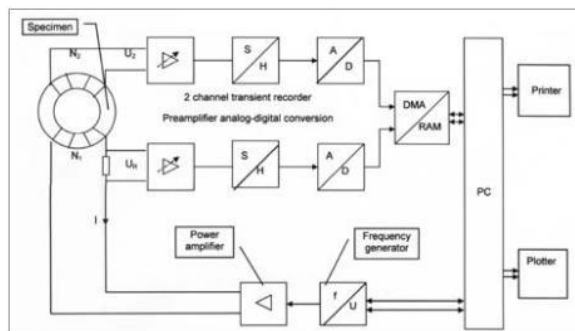
Pomocí tohoto měřicího systému lze definovat magnetovací charakteristiky nebo celé hysterezní BH charakteristiky vzorku pro nastavenou frekvenci budícího magnetického pole a další upřesňující parametry. Měření lze provádět ve frekvenčním rozsahu 1Hz – 10kHz.

Magnetické vlastnosti lze pomocí tohoto měřicího systému určovat na vzorcích uzavřených s konstantním průřezem a definovatelnou střední siločarou.

Provedení a blokové schéma tohoto měřicího systému je zobrazeno na následujícím obrázku.

Základní části tvořící tento systém jsou tyto:

- Výkonový lineární bipolární čtyř-kvadrantový zesilovač
- Rychlá DAQ (A/D - D/A) multifunkční karta PC-PCI
- Snímací a měřicí převodníky jednotlivých signálů
- Software COMP pro řízení, vyhodnocení a zpracování měření a měřených dat (společně s PC)



obr. 6. Skutečné provedení systému REMACOMP – C200 a blokové schéma

#### Základní technické parametry:

Možnosti měření:

- BH charakteristiky
- Magnetovací charakteristiky
- Demagnetizace

Nastavitelný frekvenční rozsah: 1Hz - 10kHz

Výkonový zesilovač (výstupní parametry): 400 VA;  $\pm 36V$ ;  $\pm 12A$

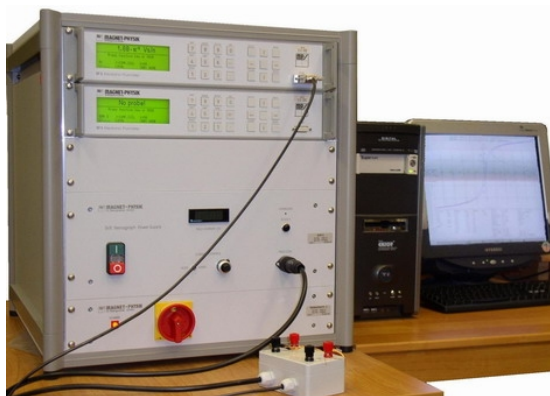
#### Další nastavitelné parametry pro vlastní měření:

Nastavitelný tvar budícího pole :	- sinus, obdélník, trojúhelník, trapéz, exponenciální puls
Možnost nastavení regulace:	- proudová ( proudové magnetování ) - napěťová (napěťové magnetování )
Rozšířené nastavení regulace:	- sinus intenzity pole H - sinus indukce pole B
Možnost nastavení mezí:	- intenzity pole Hmax - indukce pole Bmax

## **2) REMAGRAPH – C500**

Měřicí systém REMAGRAPH je určen k měření stacionárních BH charakteristik a magnetovacích charakteristik feromagneticky měkkých konstrukčních materiálů jako jsou oceli, plechy pro elektrotechniku, ferity, atd.

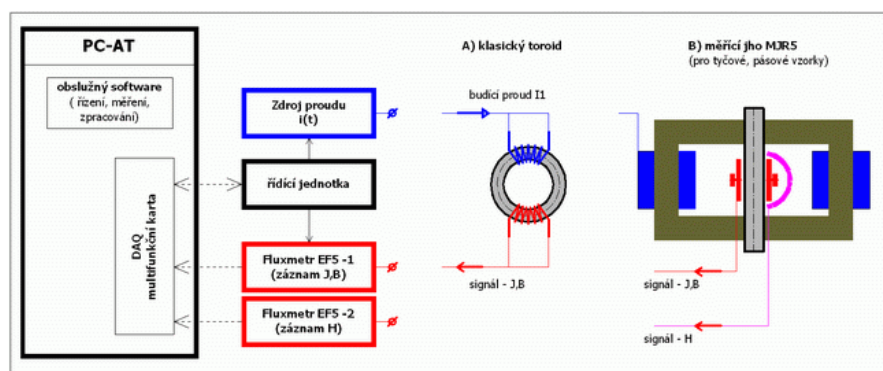
Tento měřicí systém je schopen měřit magnetické vlastnosti na uzavřených vzorcích, podobně jako u předchozího systému REMACOMP. Na následujícím obrázku je znázorněno jeho skutečné provedení.



*Obr. č. 7. Skutečné provedení měřicího systému REMAGRAPH – C500*

Princip činnosti a měřicí metody tohoto měřicího systému se liší od systému REMACOMP. Základní princip měření však stále vychází z metody měření na toroidu. Zpracovávání a vyhodnocování signálu indukovaného napětí v sekundárním vinutí, pomocí kterého je určována magnetická indukce ve vzorku, již nelze provádět osciloskopickou metodou. Důvodem je, že časová změna intenzity magnetického pole buzeného (kvazi) stacionárním proudem je velmi malá, takže v měřeném vzorku vyvolává rovněž velmi malou změnu magnetické indukce úměrnou magnetickým vlastnostem materiálu vzorku. Sekundární vinutí obklopující vzorek a v něm vytvořený rovněž velmi pomalu se měnící magnetický tok pak indukuje jen velmi malé a pozvolné napěťové impulsy. Z uvedeného důvodu je pro měření a vyhodnocování indukovaného napětí nutno použít integrační měřicí přístroj, v tomto případě elektronický fluxmetr.

Blokové schéma zapojení jednotlivých částí včetně měřeného vzorku je znázorněno na následujícím obrázku.



obr. 8. Blokové schéma měřicího systému REMAGRAPH – C500

Základní části tohoto měřicího systému tvoří:

- Výkonový napájecí zdroj stejnosměrného proudu
- Elektronický fluxmetr -1 (záznam signálu H)
- Elektronický fluxmetr -2 (záznam signálu J,B)
- Řídící jednotka (synchronizace nastavení proudu a snímání veličin)
- multifunkční komunikační karta PC-PCI
- Software REMA pro řízení, vyhodnocení a zpracování měření a měřených dat (společně s PC)

Tímto měřicím systémem lze měřit následující charakteristiky:

- BH charakteristiky (celé křivky)
- BH charakteristiky - magnetovací (pouze první kvadrant)
- Demagnetizace (nastavitelná, exponenciální sinusová,  $f_{max}$  1Hz)

#### Nastavitelné parametry pro měření:

Nastavitelná rychlost měření – magnetování  $dB/dt$  (rychlostí změny budícího proudu  $I_1$ )

Nastavitelná velikost počátečního magnetického pole - předmagnetizace

Možnost nastavení mezních hodnot pro měření: - intenzity pole  $H_{max}$

- indukce pole  $B_{max}$ ,  $J_{max}$

Výkonový zesilovač (výstupní parametry):

320 VA;  $\pm 40V$ ;  $\pm 8A$

### 3 Vlastní řešení - Analýza magnetických vlastností typových vzorků ocelí

Cílem vlastní práce bylo analyzovat magnetické vlastnosti určitých typů ocelí. Pro měření bylo získáno 11 různých vzorků konstrukčních ocelí. Tyto vzorky jsem rozdělil do tří sérií. První série čítá pět vzorků kolejnicových ocelí (AREA 136, UIC 60, UIC 54, S 54 a S 49). Druhá a třetí série obsahuje každá po třech vzorcích ocelí blíže nespecifikovaného účelu, ale požadované určitým zadavatelem.

Cílem této praktické části tedy bylo zjistit magnetické vlastnosti to je BH hysterezní charakteristiky a magnetovací charakteristiky těchto jedenácti vzorků a provést vzájemné porovnání jejich magnetických parametrů. Zjišťování jejich magnetických vlastností bylo provedeno dvěma metodami.

- a) Měření při stejnosměrném magnetování
- b) Měření při střídavém magnetování

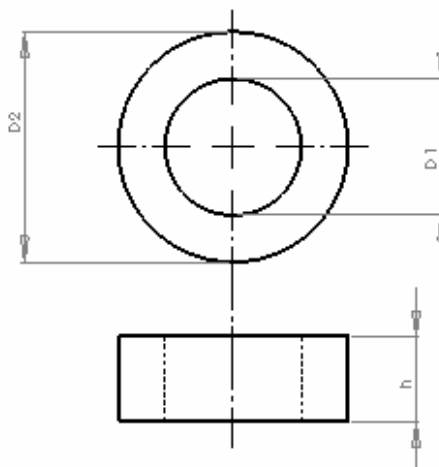
Pro tyto účely byly použity dvě měřicí pracoviště, tedy dva měřicí systémy, které budou dále blíže popsány.

#### 3.1 Přehled a příprava vzorků

Tato část práce dokumentuje přípravu vzorků typových ocelí k vlastnímu měření jejich magnetických vlastností. Jsou zde uvedeny rozměry a tvary vzorků, dále pak popis jejich přípravy pro měření včetně podrobné fotodokumentace.

##### Popis vzorků:

Vzorky měřených ocelí mají tvar prstence obdélníkového průřezu, jehož popis je na následujícím obrázku:














Obr. 9. Popis prstencového vzorku

Postup přípravy vzorků k měření:

Dodané ocelové prstence bylo nutné nejdříve zbavit otřepů a ostrých hran, které vznikaly při strojní přípravě vzorků. Jednalo se zejména o vyvrtání díry do válcového tvaru vzorku vybrané konstrukční oceli. Na odstranění otřepů a ostrých hran byly použity jemné pilníky. Takto upravené vzorky jsou uvedeny v následující tabulce.

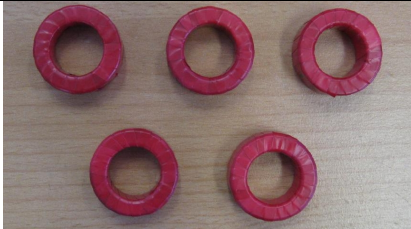


**Tab. 43.** *Přehled měřených vzorků konstrukčních ocelí*

Přehled dodaných vzorků ocelí		
Série 1		
Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3
		
Vzorek č. 4	Vzorek č. 5	
		
Série 2		
Vzorek č. 6	Vzorek č. 7	Vzorek č. 8
		
Série 3		
Vzorek č. 9	Vzorek č. 10	Vzorek č. 11
		

Po této úpravě byla provedena izolace našich vzorků izolační páskou. Tato izolace byla provedena z důvodu zamezení průchodu elektrického proudu z později navíjeného vinutí do jádra vzorku a tím zajištění zdárného provedení našeho měření. Přehled izolovaných vzorků je v tabulce 44.






**Tab. 44.** *Přehled – vzorky opatřeny izolací*

Série 1	
Série 2	
Série 3	

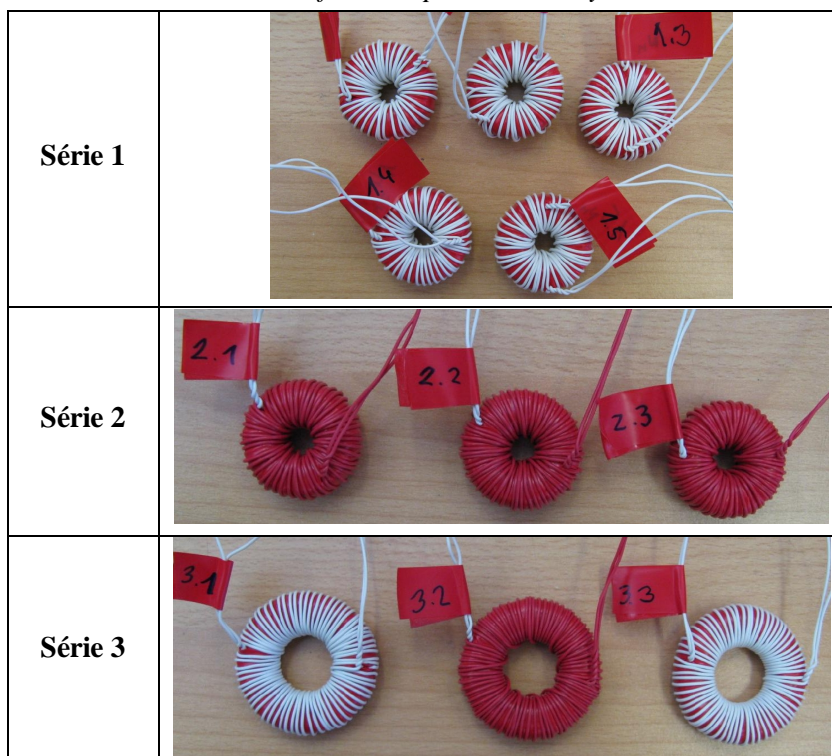
Po provedení izolace jader vzorků přišlo na řadu navíjení vinutí. Nejdříve bylo navinuto tzv. „měřící vinutí“. K tomuto účelu byl použit izolovaný drát o průřezu  $1\text{mm}^2$ . Kvalita navinutí této cívky má vliv na přesnost měření, proto bylo nutné jej navinout co nejrovnoměrněji po celém obvodu prstence. Vzorky s navinutými měřicími cívkami jsou uvedeny v tabulce 45.

**Tab. 45.** *Přehled – vzorky s navinutým budícím vinutím*

Série 1	
Série 2	
Série 3	

Poté byla navinuta další izolační vrstva opět izolační páskou z důvodu zamezení případného vodivého spojení měřicího vinutí a následně navíjeného budícího vinutí. Tato cívka byla navinuta stejným drátem jako měřící vinutí. I zde byla snaha o co nejrovnoměrnější navíjení závitů po obvodu prstence tak, aby zmagnetování jádra vzorku bylo dostatečně rovnoměrné. Budící vinutí je navinuto ve dvou vzájemně izolovaných vrstvách. Izolace mezi vrstvami je opět provedena izolační páskou. Při navíjení druhé vrstvy magnetizačního vinutí bylo nutné dodržet směr navíjení cívky shodný se směrem navíjení první vrstvy vinutí. Hotové vzorky jsou zobrazeny v následující tabulce 46.

**Tab. 46.** *Přehled – finálně upravené vzorky*



V následujících třech tabulkách jsou uvedeny parametry jednotlivých vzorků oceli připravených k měření. U každého vzorku jsou uvedeny jeho rozměry (vnitřní průměr prstence  $D_1$ , vnější průměr prstence  $D_2$  a výška prstence  $h$ ), dále pak počet závitů magnetizačního vinutí  $N_1$  a počet závitů budícího vinutí  $N_2$ .

Příprava těchto vzorků k měření byla velmi zdoluhavá a pracná. Navíjení izolace a vinutí všech jedenácti vzorků zabralo přibližně 10 dní.

**Tab. 47.** *Základní údaje o vzorcích série 1*

Číslo vzorku	Označení	Typ kolejničky	Rozměry			Počet závitů cívek	
			$D_1$ [mm]	$D_2$ [mm]	$h$ [mm]	$N_2$ [-]	$N_1$ [-]
1	24 226	AREA 136	16,9	26,9	10,1	47	83
2	21 756	UIC 60	16,9	27	10,1	49	84
3	21 025	UIC 54	16,9	27,2	10,1	48	82
4	23 923	S 54	17	27	10,1	48	83
5	25 516	S 49	17	27,4	10,1	50	82

**Tab. 48.** *Základní údaje o vzorcích série 2*

Číslo vzorku	Označení	Rozměry			Počet závitů cívek	
		D <sub>1</sub> [mm]	D <sub>2</sub> [mm]	h [mm]	N <sub>2</sub> [-]	N <sub>1</sub> [-]
6	37 065	16,9	27,1	9,6	47	82
7	36 846	17	27	9,25	49	82
8	37 892	17	27	9,5	48	82

**Tab. 49.** *Základní údaje o vzorcích série 3*

Číslo vzorku	Označení	Rozměry			Počet závitů cívek	
		D <sub>1</sub> [mm]	D <sub>2</sub> [mm]	h [mm]	N <sub>2</sub> [-]	N <sub>1</sub> [-]
9	41 899	26	39,2	5,1	74	139
10	41 918	25,8	38,9	5	74	137
11	41 904	25,8	39,3	5	77	136

Specifikace vzorků série 1

Vzorky série 1 byly podrobeny spektrální analýze, která zjistila jejich chemické složení. Toto je uvedeno v následující tabulce. Chemické složení je získáno ze zdroje [11].

**Tab. 50** *Chemické složení ocelí – Série 1*

Série 1 – Kolejnicové oceli					
Chemické složení v %					
Obsažený prvek	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4	Vzorek č. 5
C	0,735	0,714	0,724	0,716	0,706
Mn	1,05	0,93	0,90	1,12	0,88
Si	0,32	0,33	0,34	0,26	0,35
P	0,015	0,019	0,023	0,023	0,018
S	0,013	0,017	0,018	0,007	0,012
Cu	0,05	0,05	0,06	0,04	0,06
Cr	0,98	0,05	0,07	0,05	0,07
Ni	0,04	0,02	0,03	0,03	0,04
Mo	0,164	0,001	0,007	0,001	0,004
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
V	0,050	0,003	0,003	0,003	0,003
Ti	0,0001	0,001	0,001	0,001	0,001
Co	0,003	0,002	0,003	0,003	0,002
As	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Sn	0,005	0,003	0,004	0,004	0,004
B	0,0002	0,003	0,0002	0,0002	0,0002

Nejvýraznější rozdíl v chemickém složení oproti ostatním vzorkům má kolejnicová ocel AREA 136 (vzorek č.1). Liší se zejména ve zvýšeném obsahu chromu (téměř o 1%) a také má zvýšený obsah molybdenu (asi o 0,15%). Ostatní vzorky mají chemické složení vzájemně podobné, ale v některých hodnotách se drobně liší. Z tohoto porovnání lze předpokládat, že vzorek č. 1 bude mít oproti ostatním

vzorkům nejvýraznější rozdíl v magnetických vlastnostech. U Dalších čtyř vzorků lze předpokládat, že se hysterezní smyčky budou lišit podobně, jako se liší jejich chemické složení. Tedy pouze málo.

## 3.2 Vlastní měření

Jak již bylo dříve zmíněno, zjišťování magnetických vlastností našich vzorků konstrukčních ocelí bylo provedeno jednak ve statickém magnetickém poli (systém REMAGRAPH C-500) a také v dynamickém magnetickém poli (systém REMACOMP C-200). V následujícím odstavci budou popsány postupy těchto měření.

Měření ve statickém magnetickém poli bylo u každého vzorku provedeno pro různé meze intenzity magnetického pole ( $H_{\max}$ ) a také pro různé meze magnetické indukce ( $B_{\max}$ ). Přehled těchto hodnot je uveden v následující tabulce 51. Výstupem tohoto měření byla kompletní hysterezní smyčka včetně magnetizační křivky.

Toto měření bylo časově velmi náročné. Proměření všech 11 vzorků zabralo přibližně 4 dny a další 2 dny zabraly zpracování změřených údajů.

**Tab. 51.** *Přehled mezních hodnot při měření*

$H_{\max}$ (A/m)	1000	3000	5000	7000	9000	10000
$B_{\max}$ (T)	0,5	1	1,5			

Měření v dynamickém magnetickém poli bylo rovněž provedeno u každého vzorku a to pro čtyři různé frekvence ( $f$ ) budícího pole (5, 25, 50, 100 Hz). Pro každou frekvenci bylo měření provedeno pro pět různých mezí intenzity magnetického pole ( $H_{\max}$ ). Konkrétně pro hodnoty 500, 1000, 2000, 5000 a 10000 A/m. Při tomto měření byla zvlášť zjišťována hysterezní smyčka a zvlášť křivka prvotní magnetizace a relativní permeability ( $\mu_r$ ).

Tato měření byla časově méně náročná než měření ve statickém magnetickém poli. Přesto však proměření vzorků a zpracování údajů zabralo asi 4 dny.

### 3.2.1 Přehled změřených magnetických vlastností jednotlivých vzorků

Nyní bude následovat shrnutí výsledků formou miniatur obrázků změřených hysterezních a magnetizačních charakteristik jednotlivých vzorků ocelí. V následující tabulce je popsán systém, kterým budou výsledky zobrazovány.

**Tab. 52.** *Popis následujících výsledků měření*

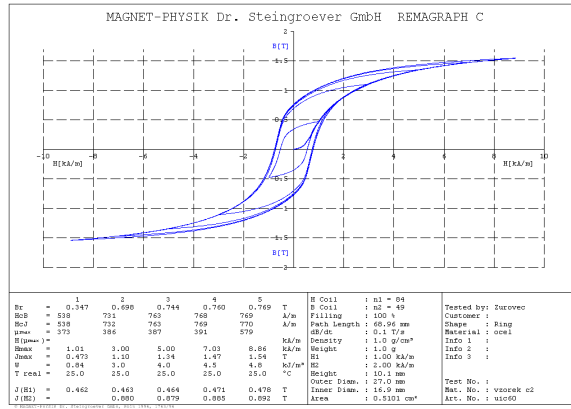
Číslo obrázku	Popis obrázku
Obr. 1	Statické BH charakteristiky pro meze $H_{\max}$ (1, 3, 5, 7, 10) [kA/m]
Obr. 2	Statické BH charakteristiky pro meze $B_{\max}$ (0,5, 1, 1,5) [T]
Obr. 3	Dynamické BH charakteristiky: $f = 5$ Hz; meze $H_{\max}$ (0,5, 1, 2, 5, 10) [kA/m]
Obr. 4	Dynamické BH charakteristiky: $f = 50$ Hz; meze $H_{\max}$ (0,5, 1, 2, 5, 10) [kA/m]
Obr. 5	Dynamické BH charakteristiky pro $H_{\max} = 10$ kA/m; pro různé $f$ (5, 25, 50, 100) [Hz]
Obr. 6	Dynamická magnetovací charakteristika a křivka relativní permeability pro $H_{\max} = 10$ kA/m; pro různé $f$ (5, 25, 50, 100) [Hz]



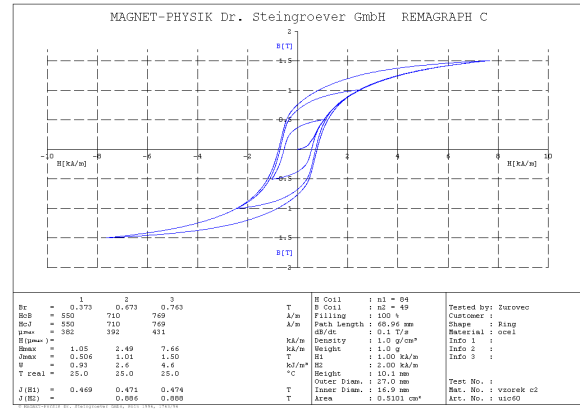
# Výsledky měření – Série 1

## Vzorek č. 2

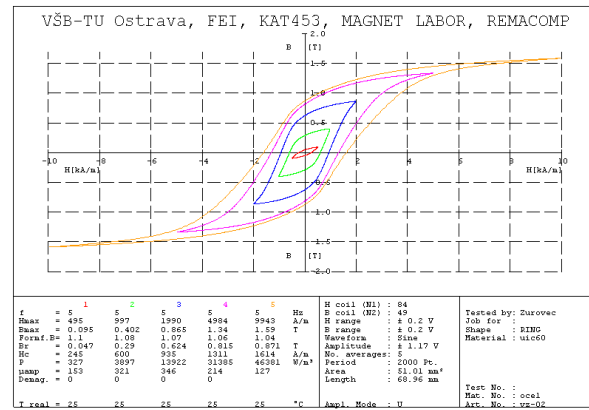
Obr.1 - DC BH-char pro Hmax 1,3,5,7,10 kA/m



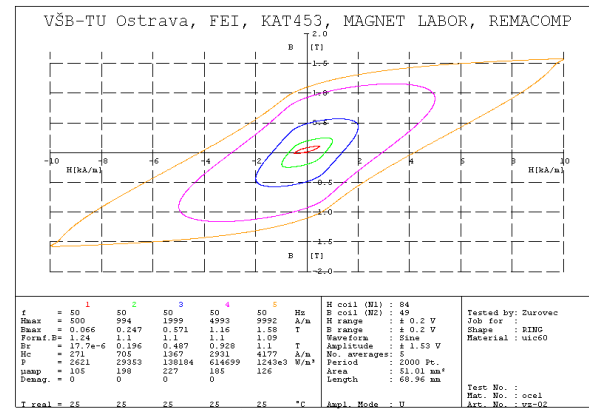
Obr.2 - DC BH-char pro Bmax 0,5, 1, 1,5 T



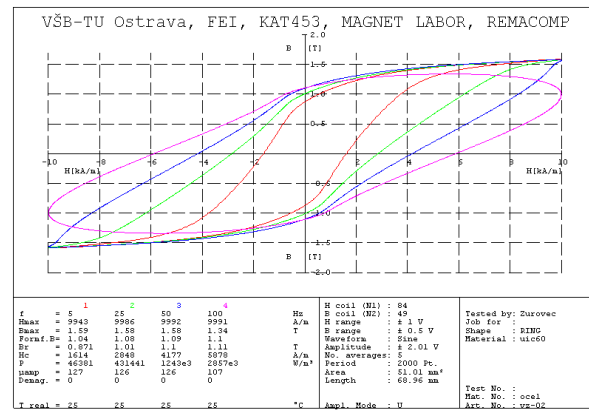
Obr.3 - AC BH-char pro f=5Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



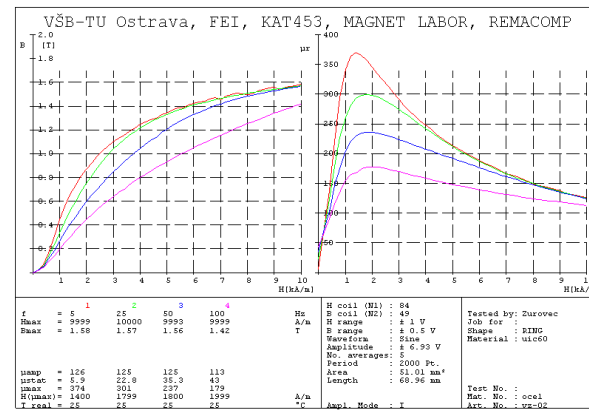
Obr.4 - AC BH-char pro f=50Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



Obr.5 – AC BH-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



Obr.6 – AC MAG-char a μr-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



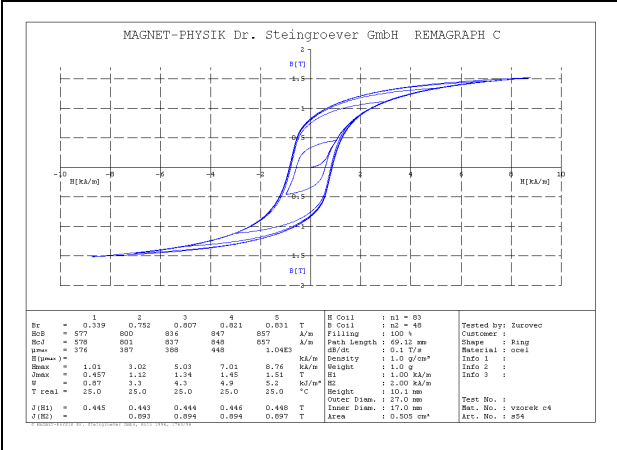




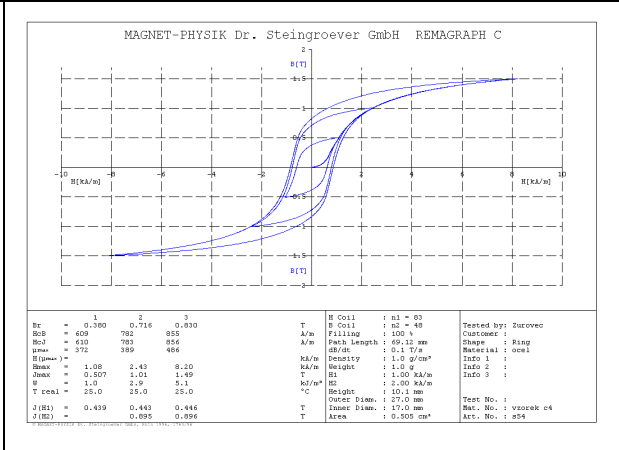
Výsledky měření – Série 1	
---------------------------	--

**Vzorek č. 4**

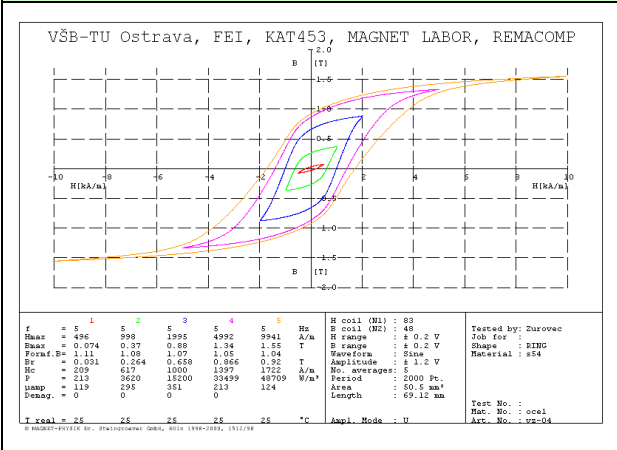
Obr.1 - DC BH-char pro  $H_{max}$  1,3,5,7,10 kA/m



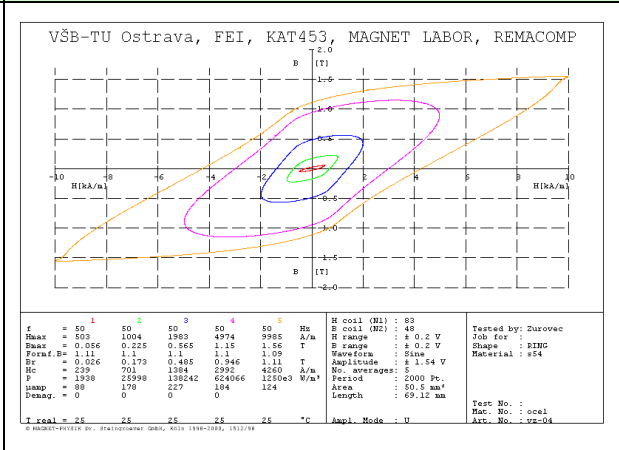
Obr.2 - DC BH-char pro  $B_{max}$  0,5, 1, 1,5 T



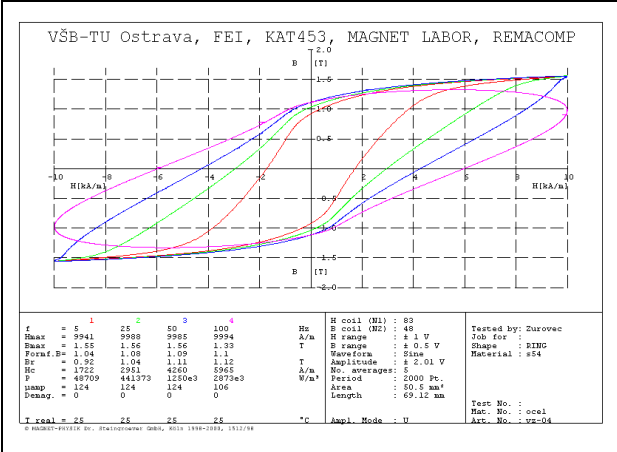
Obr.3 - AC BH-char pro $f=5\text{Hz}$ a $H_{\text{max}} = (0,5, 1, 2, 5, 10) \text{ kA/m}$
---



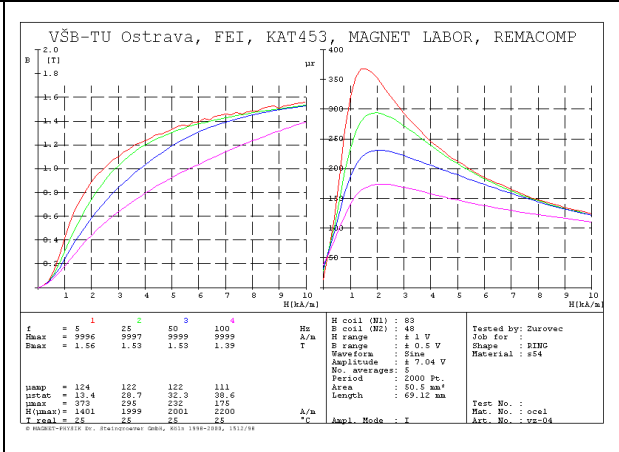
Obr.4 - AC BH-char pro $f=50\text{Hz}$ a $H_{\text{max}} = (0,5, 1, 2, 5, 10) \text{ kA/m}$
--



Obr.5 – AC BH-char pro  $H_{max}=10\text{kA/m}$  a  $f=(5, 25, 50, 100)$  Hz



Obr.6 – AC MAG-char a $\mu_r$ -char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz
--

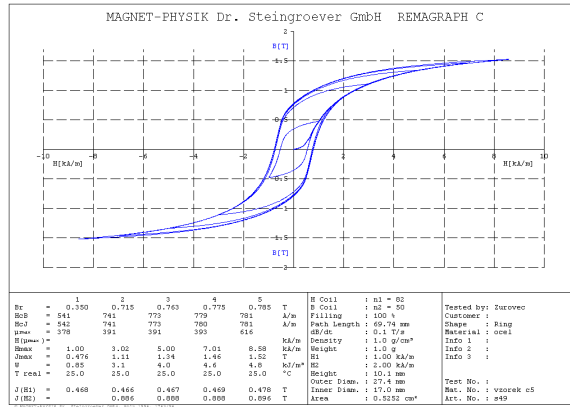




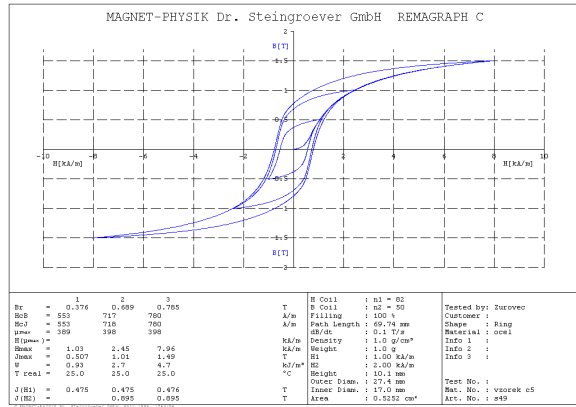
# Výsledky měření – Série 1

## Vzorek č. 5

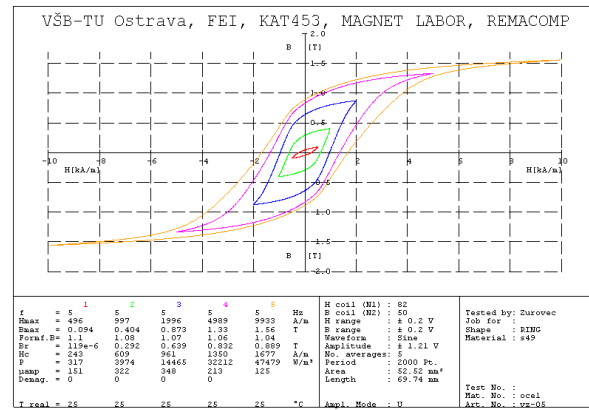
Obr.1 - DC BH-char pro Hmax 1,3,5,7,10 kA/m



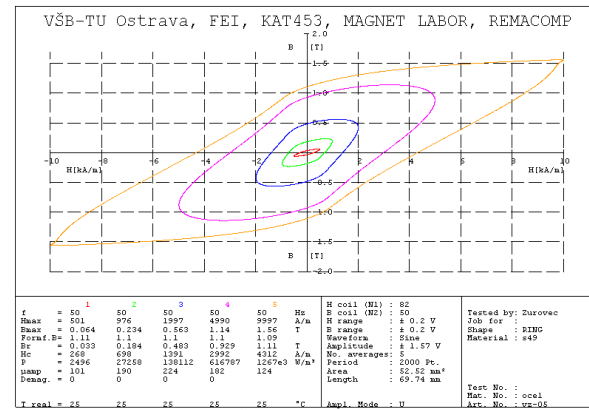
Obr.2 - DC BH-char pro Bmax 0,5, 1, 1,5 T



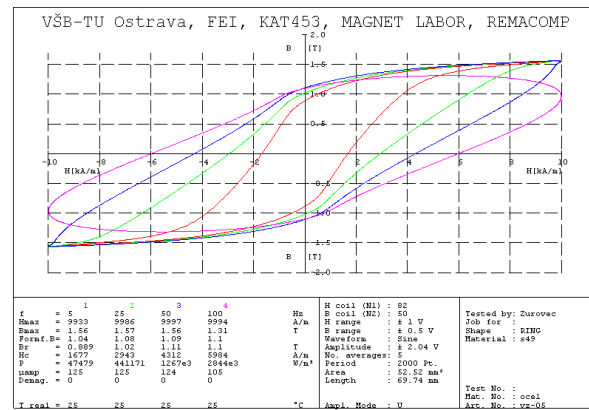
Obr.3 - AC BH-char pro f=5Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



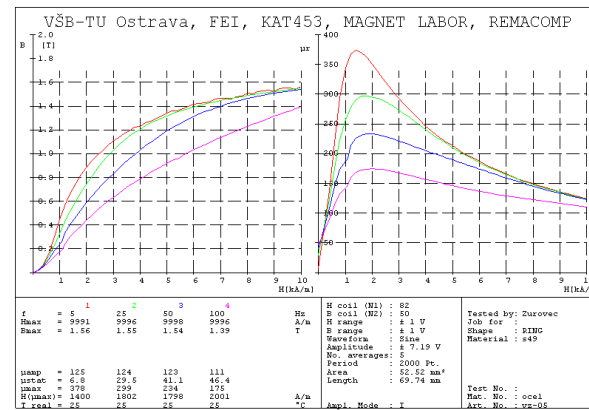
Obr.4 - AC BH-char pro f=50Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



Obr.5 – AC BH-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



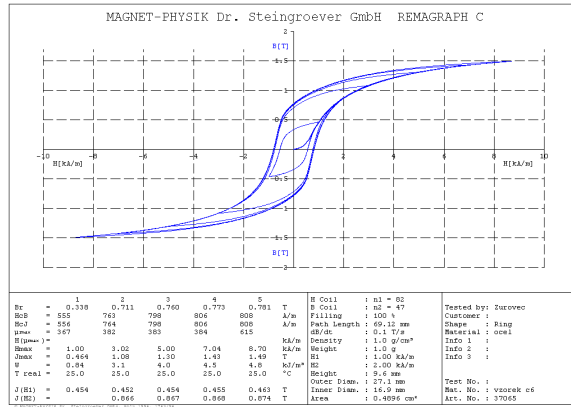
Obr.6 – AC MAG-char a μr-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



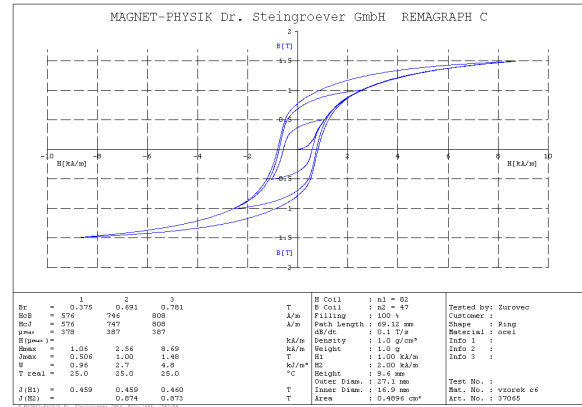
# Výsledky měření – Série 2

## Vzorek č. 6

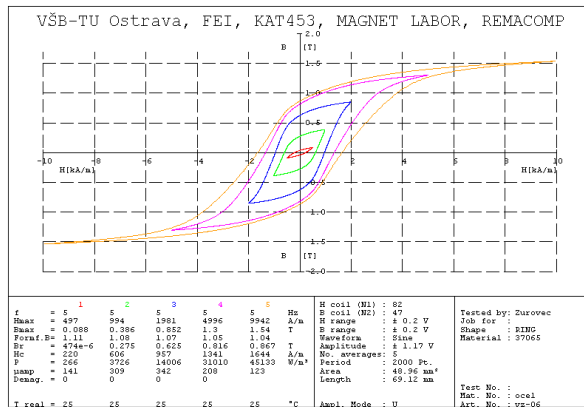
Obr.1 - DC BH-char pro Hmax 1,3,5,7,10 kA/m



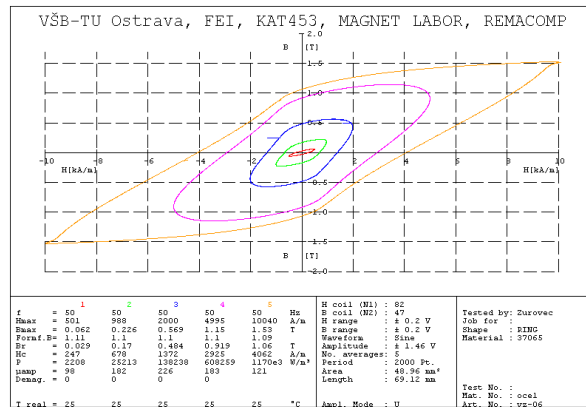
Obr.2 - DC BH-char pro Bmax 0,5, 1, 1,5 T



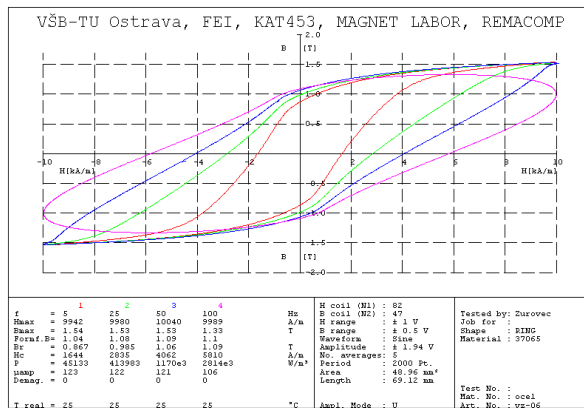
Obr.3 - AC BH-char pro f=5Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



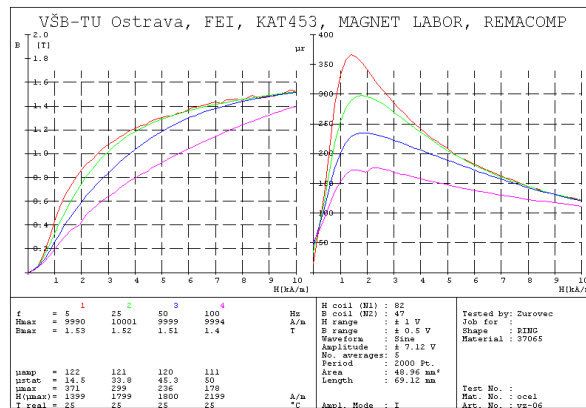
Obr.4 - AC BH-char pro f=50Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



Obr.5 – AC BH-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



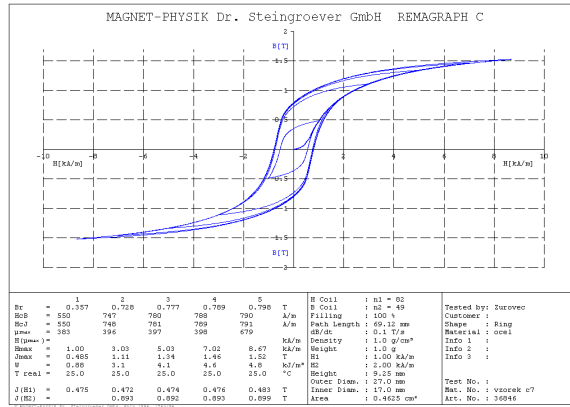
Obr.6 – AC MAG-char a μr-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



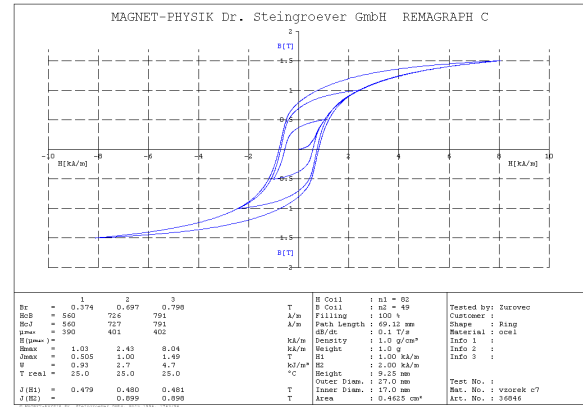
# Výsledky měření – Série 2

## Vzorek č. 7

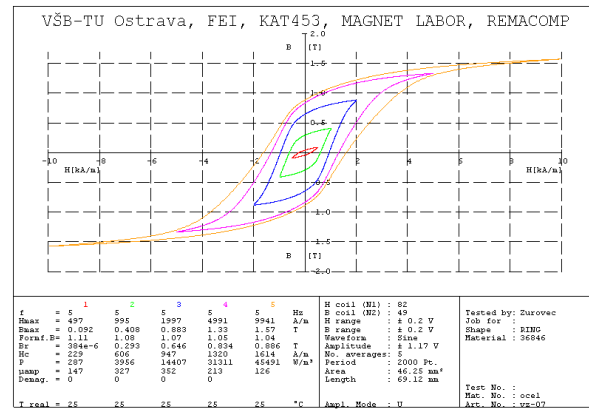
Obr.1 - DC BH-char pro Hmax 1,3,5,7,10 kA/m



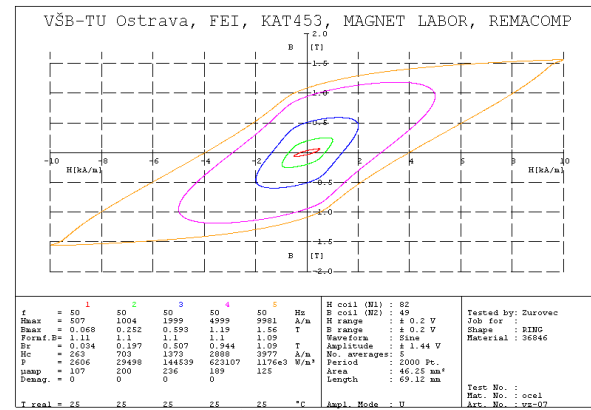
Obr.2 - DC BH-char pro Bmax 0,5, 1, 1,5 T



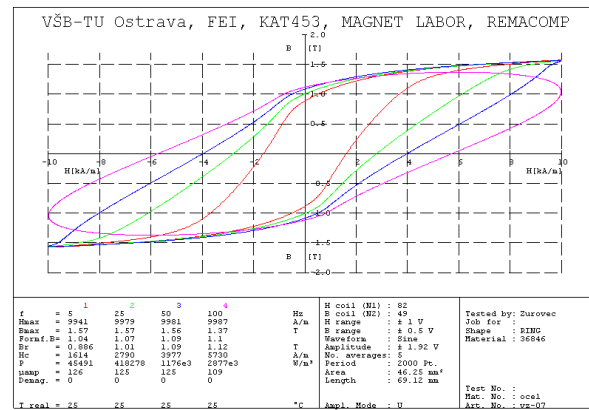
Obr.3 - AC BH-char pro f=5Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



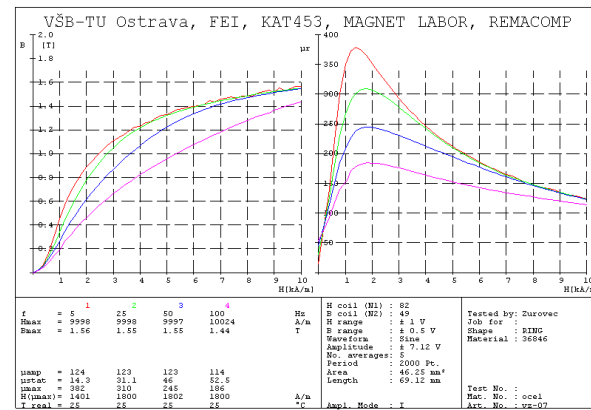
Obr.4 - AC BH-char pro f=50Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



Obr.5 – AC BH-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



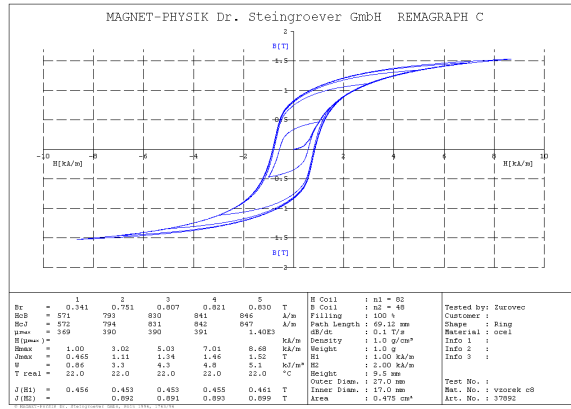
Obr.6 – AC MAG-char a μr-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



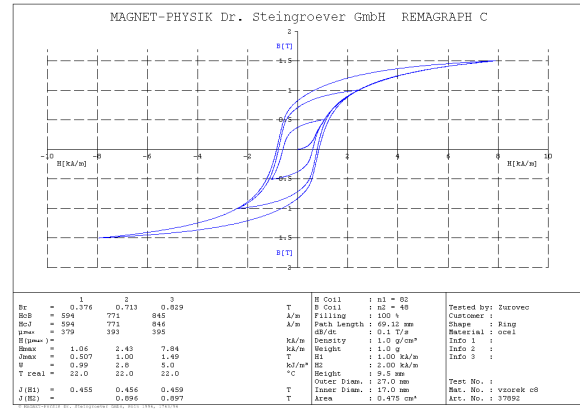
# Výsledky měření – Série 2

## Vzorek č. 8

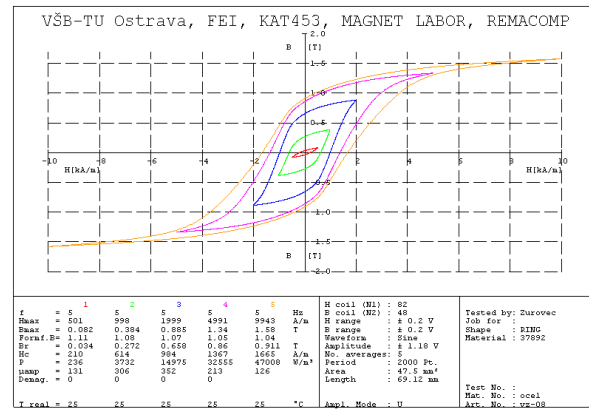
Obr.1 - DC BH-char pro Hmax 1,3,5,7,10 kA/m



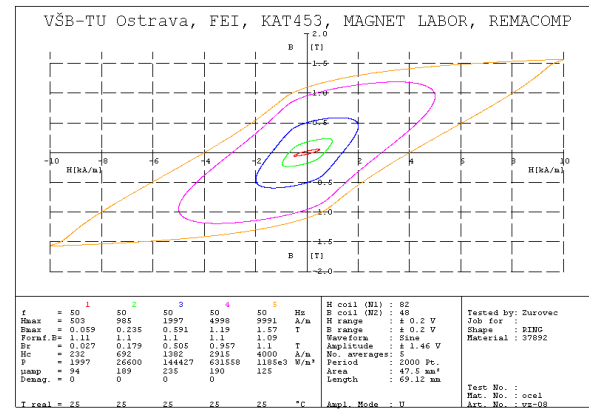
Obr.2 - DC BH-char pro Bmax 0,5, 1, 1,5 T



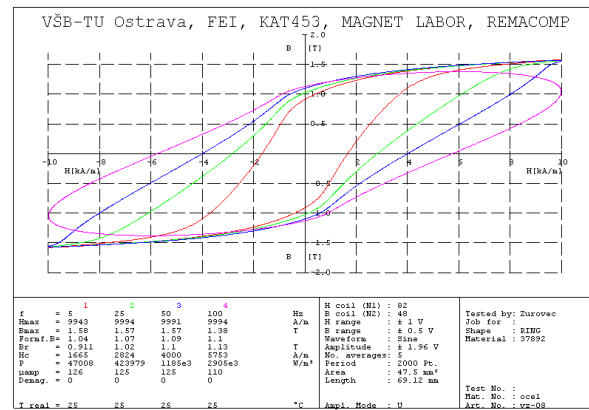
Obr.3 - AC BH-char pro f=5Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



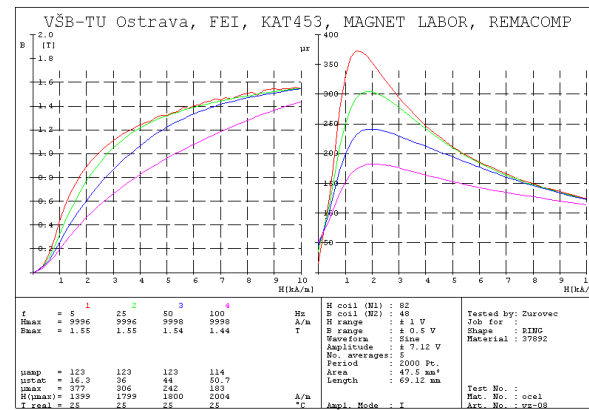
Obr.4 - AC BH-char pro f=50Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



Obr.5 – AC BH-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



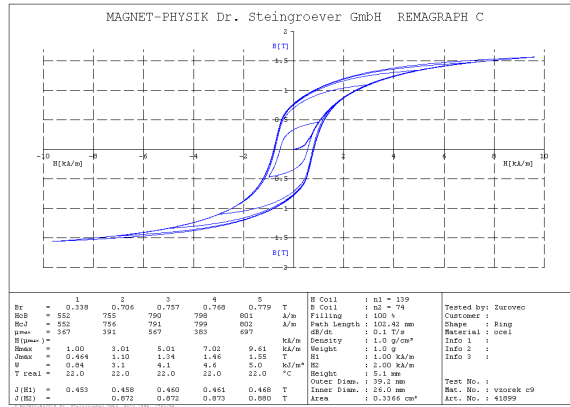
Obr.6 – AC MAG-char a μr-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



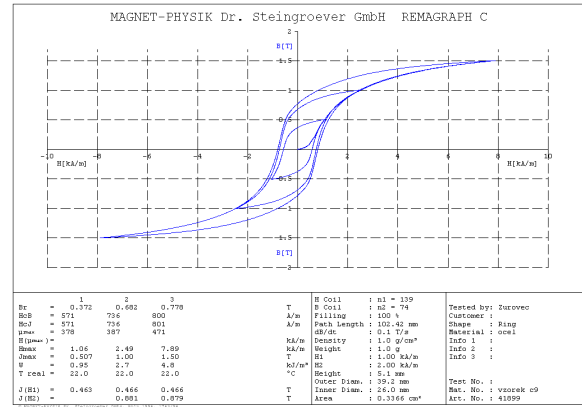
# Výsledky měření – Série 3

## Vzorek č. 9

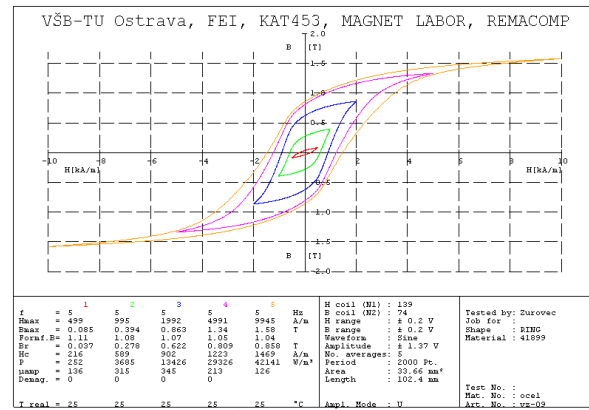
Obr.1 - DC BH-char pro Hmax 1,3,5,7,10 kA/m



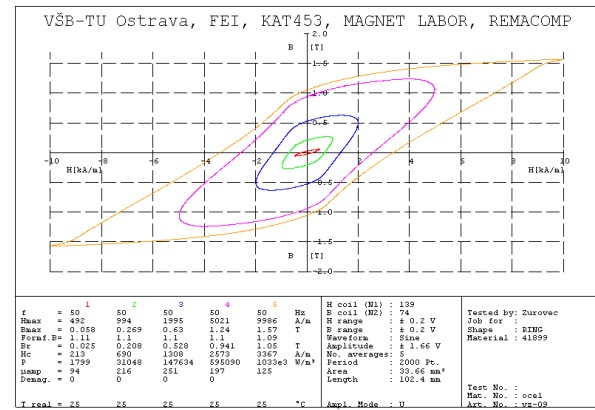
Obr.2 - DC BH-char pro Bmax 0,5, 1, 1,5 T



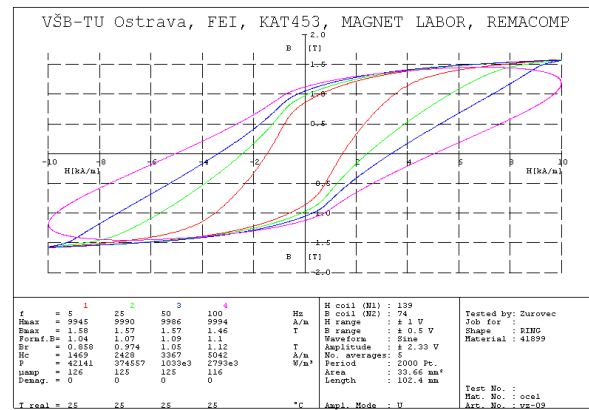
Obr.3 - AC BH-char pro f=5Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



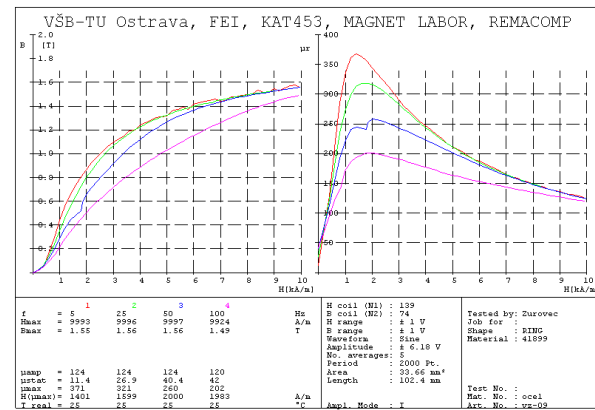
Obr.4 - AC BH-char pro f=50Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



Obr.5 – AC BH-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



Obr.6 – AC MAG-char a μr-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz

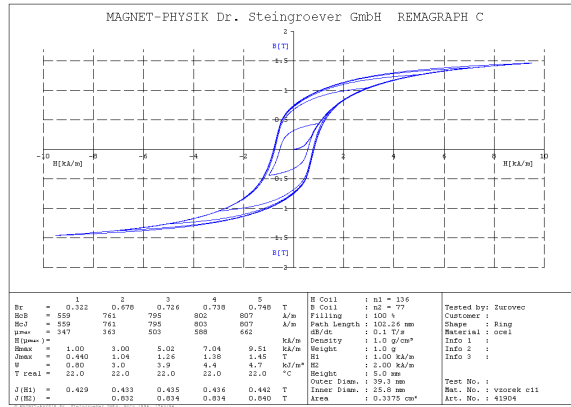




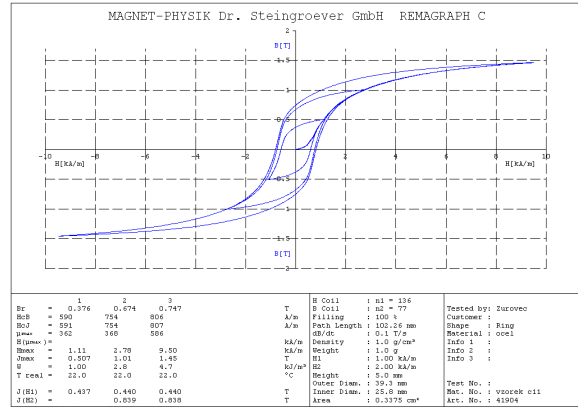
# Výsledky měření – Série 3

## Vzorek č. 11

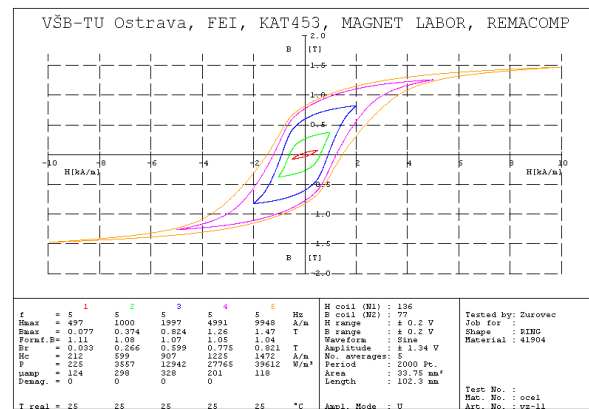
Obr.1 - DC BH-char pro Hmax 1,3,5,7,10 kA/m



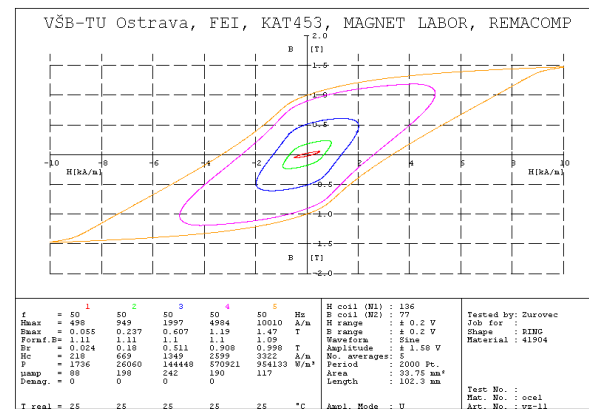
Obr.2 - DC BH-char pro Bmax 0,5, 1, 1,5 T



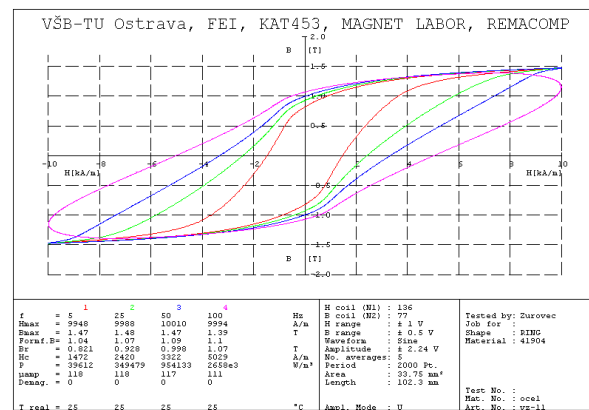
Obr.3 - AC BH-char pro f=5Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



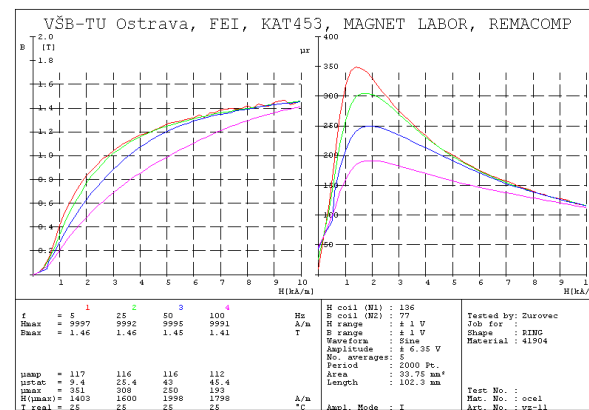
Obr.4 - AC BH-char pro f=50Hz a Hmax= (0,5, 1, 2, 5, 10) kA/m



Obr.5 – AC BH-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



Obr.6 – AC MAG-char a μr-char pro Hmax=10kA/m a f=(5, 25, 50, 100) Hz



### Měření ve statickém magnetickém poli

Výsledky tohoto měření dokumentují obrázky 1 a 2 každého vzorku v předcházejícím přehledu výsledků. Je z nich patrné jak se liší BH hysterezní smyčky v závislosti na nastavení parametrů statického budícího pole, jak je naznačeno v popiscích obrázků.

### Měření v dynamickém magnetickém poli

Obrázky 3 a 4 každého měřeného vzorku znázorňují porovnání tvarů BH hysterezních smyček v závislosti na nastavení maximální intenzity budícího magnetického pole ( $H_{\max}$ ) a jeho frekvence ( $f$ ), jak je naznačeno v popiscích obrázků.

Obrázek 5 každého vzorku vyjadřuje vliv frekvence magnetického pole na tvar BH hysterezní smyčky. Je zřejmé, že při vzrůstu frekvence budícího magnetického pole je hysterezní smyčka širší a také tvarově zkreslená.

Na obrázcích s pořadovým číslem 6 každého vzorku jsou uvedeny dvě charakteristiky. Vlevo je znázorněna amplitudová magnetizační křivka a vpravo křivka relativní permeability. V obrázcích jsou porovnány křivky v závislosti na různé frekvenci budícího magnetického pole, jak je naznačeno v popiscích obrázků.

## **3.2.2 Porovnání magnetických vlastností jednotlivých sérií vzorků ve statickém magnetickém poli**

V této části práce budou vyhodnoceny rozdíly ve statických magnetických vlastnostech jednotlivých vzorků ocelí. V miniaturách obrázků jsou zobrazena porovnání hysterezních smyček jednotlivých sérií vzorků a v přehledných tabulkách jsou uvedeny základní změřené magnetické parametry vzorků.

### Série 1

**Tab. 53.** *Změřené magnetické parametry – Série 1*

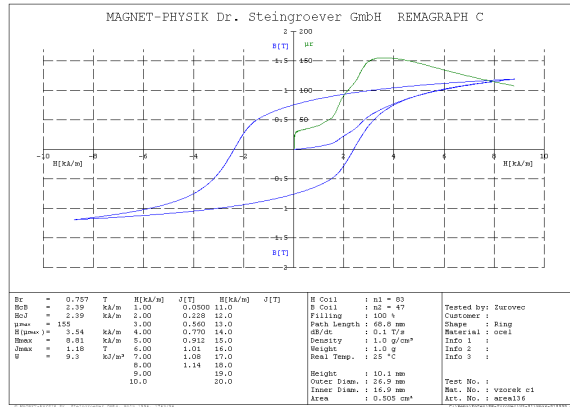
Veličina	Číslo vzorku				
	1	2	3	4	5
$B_r$ (T)	0,757	0,769	0,785	0,831	0,785
$H_c$ (A/m)	2390	770	775	857	781
$\mu_{\max}$	155	579	1040	1040	616
$H_{\max}$ (A/m)	8810	8860	8860	8760	8580
$B_{\max}$ (T)	1,18	1,54	1,53	1,51	1,52
$W$ (kJ/m <sup>3</sup> )	9,3	4,8	4,9	5,2	4,8



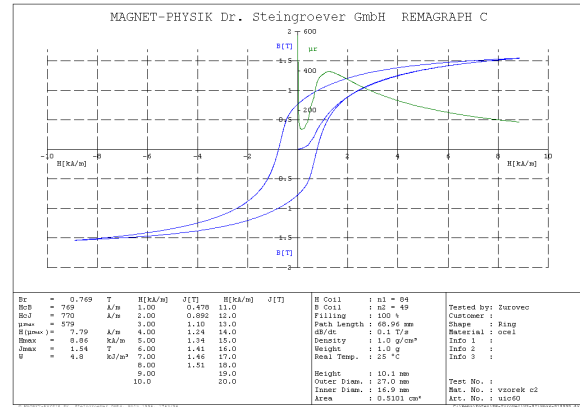
# Výsledky statického měření – Série 1

## Přehled a porovnání vzorků

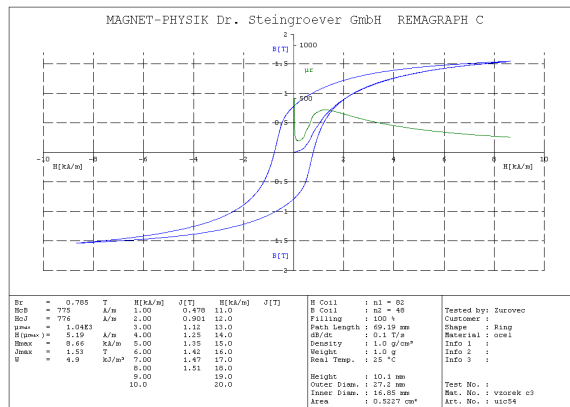
Obr.1 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – VZ 1



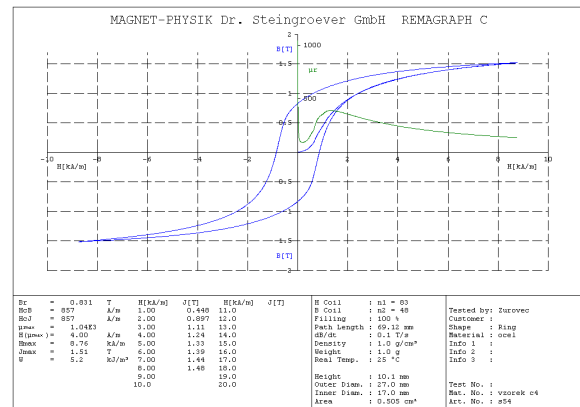
Obr.2 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – VZ 2



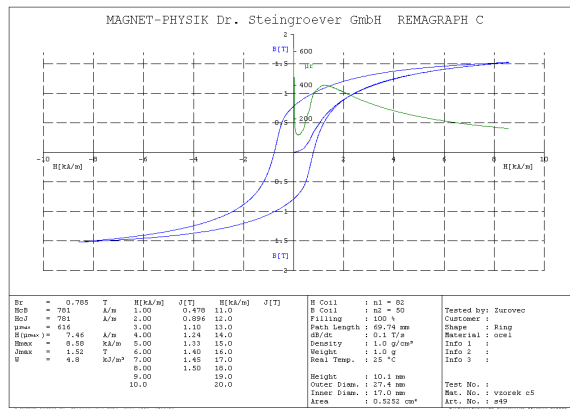
Obr.3 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – VZ 3



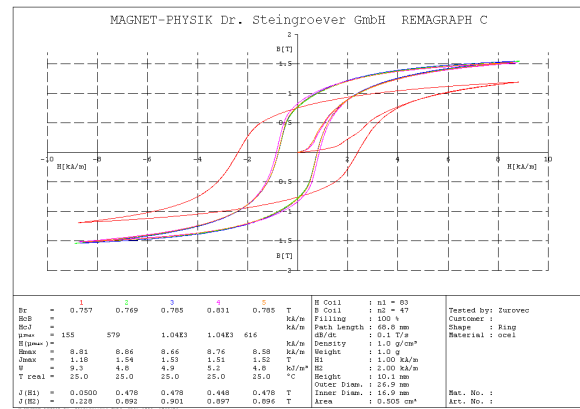
Obr.4 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – VZ 4



Obr.5 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – VZ 5



Obr.6 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – Porovnání: VZ 1 – VZ 2 – VZ 3 – VZ 4 – VZ 5



Z výsledků je patrné, že v této sérii vzorků kolejnicových ocelí se tvar BH hysterezní smyčky nejvýrazněji odlišuje u vzorku kolejnicové oceli AREA 136, označeném jako vzorek č. 1. Zbylé čtyři vzorky této série (UIC 60, UIC 54, S 54 a S 49) mají tvar BH hysterezní charakteristiky velmi podobný a liší se jen nepatrně. Tyto poznatky se daly po nahlédnutí do tabulky 50, kde je uvedeno chemické složení těchto ocelí očekávat. Nejvýraznější odchylky v chemickém složení vzorků této série má totiž právě ocel AREA 136.

Co se týče základních parametrů hysterezních smyček série 1, tak tyto jsou uvedeny v tabulce 53. Remanentní indukce ( $B_r$ ) všech vzorků série 1 jsou velmi podobné a nabývají přibližně hodnoty 0,8 T. U oceli AREA 136, dosahuje koercitivní síla ( $H_c$ ) hodnoty téměř 2400 A/m, což je relativně velký rozdíl oproti hodnotě ostatních vzorků série, kde koercitivní síla dosahuje přibližně hodnoty 800 A/m. Vzorky série 1 dosahují nasycení při intenzitě magnetického pole o hodnotě přibližně 8800 A/m, u oceli S 54 je tato hodnota asi 8600 A/m. Při těchto hodnotách nasycení dosahuje velikost magnetické indukce oceli AREA 136 hodnoty 1,18 T a u ostatních vzorků série je tato hodnota velmi podobná. A to asi 1,5 T.

## Série 2

**Tab. 54.** *Změřené magnetické parametry – Série 2*

Veličina	Číslo vzorku		
	6	7	8
$B_r$ (T)	0,781	0,798	0,836
$H_c$ (A/m)	808	790	846
$\mu_{\max}$	615	679	1400
$H_{\max}$ (A/m)	8700	8670	8680
$B_{\max}$ (T)	1,49	1,52	1,52
$W$ (kJ/m <sup>3</sup> )	4,8	4,8	5,1

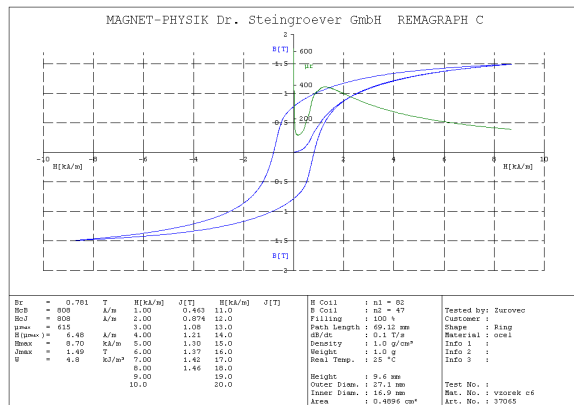
Vzorky ocelí této série mají magnetické vlastnosti vzájemně velmi podobné. Jak je patrné z následujícího přehledu a také z tabulky 54, kde jsou uvedeny změřené základní magnetické parametry jednotlivých vzorků.

Remanentní indukce ( $B_r$ ) dosahuje hodnot okolo 0,8 T a koercitivní síla ( $H_c$ ) má velikost přibližně 800 A/m. Vzorky nabývají nasycení okolo hodnoty intenzity magnetického pole 8700 A/m. Při těchto hodnotách dosahují v maximu magnetické indukce přibližně 1,5 T.

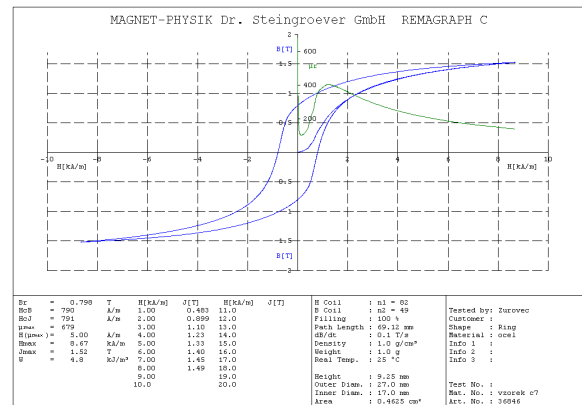
## Výsledky statického měření – Série 2

### Přehled a porovnání vzorků

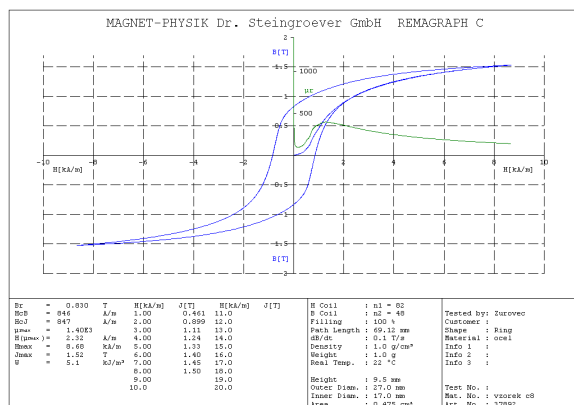
Obr.1 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – VZ 6



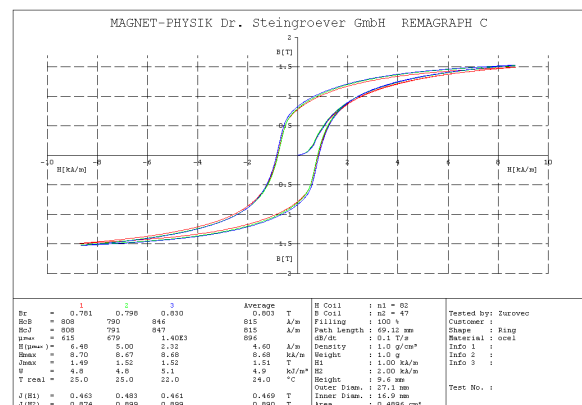
Obr.2 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – VZ 7



Obr.3 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – VZ 8



Obr.4 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – Porovnání: VZ 6 – VZ 7 – VZ 8



## Série 3

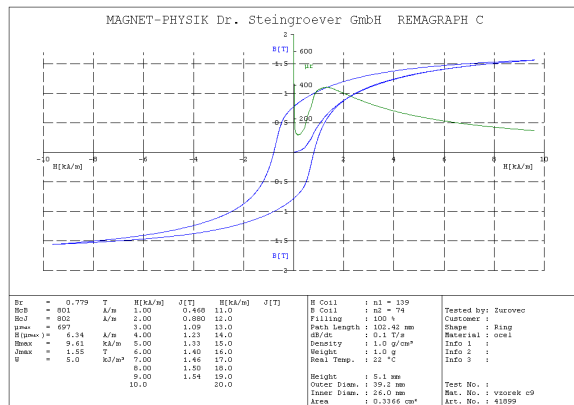
Tab. 55. Změřené magnetické parametry – Série 3

Veličina	Číslo vzorku		
	9	10	11
B <sub>r</sub> (T)	0,779	0,837	0,748
H <sub>c</sub> (A/m)	801	855	807
μ <sub>max</sub>	697	864	662
H <sub>max</sub> (A/m)	9610	9560	9510
B <sub>max</sub> (T)	1,55	1,56	1,45
W (kJ/m³)	5,0	5,2	4,7

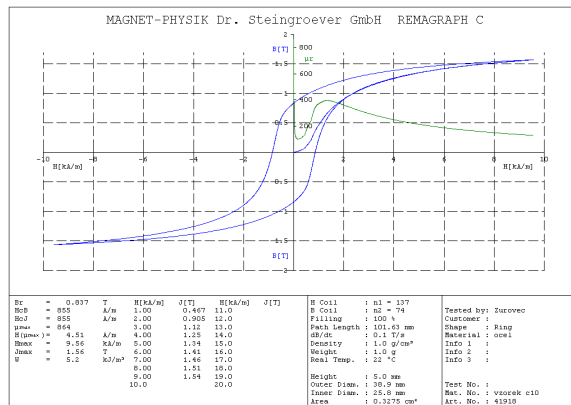
## Výsledky statického měření – Série 3

### Přehled a porovnání vzorků

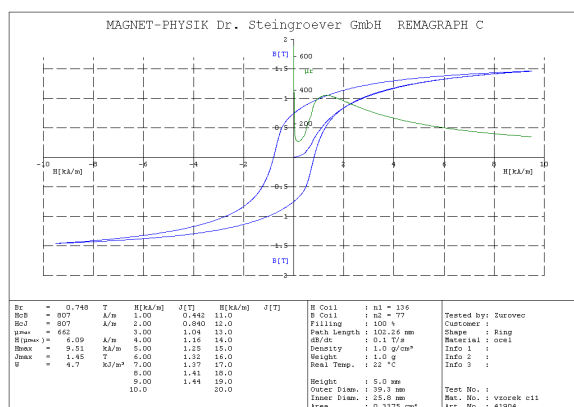
Obr.1 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – VZ 9



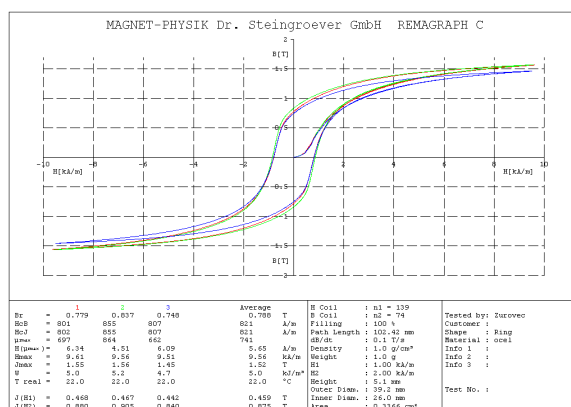
Obr.2 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – VZ 10



Obr.3 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – VZ 11



Obr.4 - DC BH-char pro Hmax 10 kA/m – Porovnání: VZ 9 – VZ 10 – VZ 11



Konstrukční oceli této série mají obdobně jako v sérii 2 magnetické vlastnosti velmi podobné. Je to patrné z předešlého přehledu BH hysterezních charakteristik a také z magnetických parametrů uvedených v tabulce 55. Remanentní indukce ( $B_r$ ) těchto ocelí nabývá hodnot okolo 0,8 T. Koercitivní síla ( $H_c$ ) má velikost okolo 800 resp. 850 A/m. Oceli nabývají nasycení okolo hodnoty 9500 A/m. Při něm dosahují maximální indukce magnetického pole okolo 1,5 T.

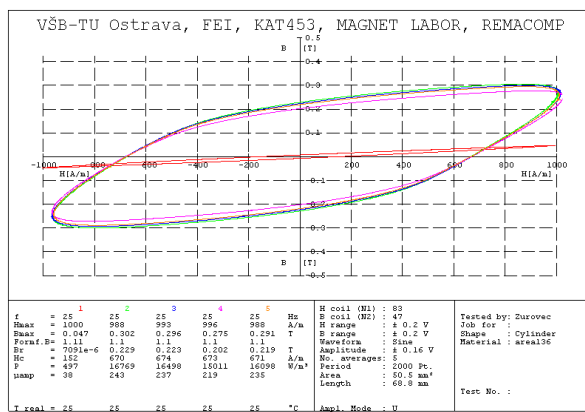
### 3.2.3 Porovnání magnetických vlastností jednotlivých sérií vzorků v dynamickém magnetickém poli

V následujícím přehledu jsou porovnány dynamické magnetické vlastnosti měřených vzorků ocelí v jednotlivých sériích 1, 2 a 3. V přehledu porovnání dynamických BH hysterezních charakteristik jsou zobrazeny miniatury obrázků změřených hysterezních smyček pro různé frekvence ( $f = 25, 50$  a  $100$  Hz) a pro dvě mezní hodnoty intenzity budícího magnetického pole ( $H_{\max} = 1000$  a  $10000$  A/m).

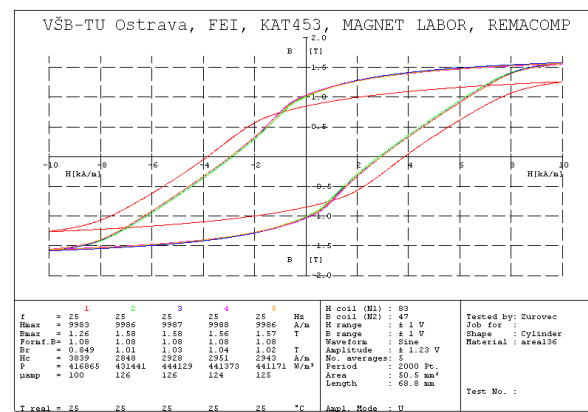
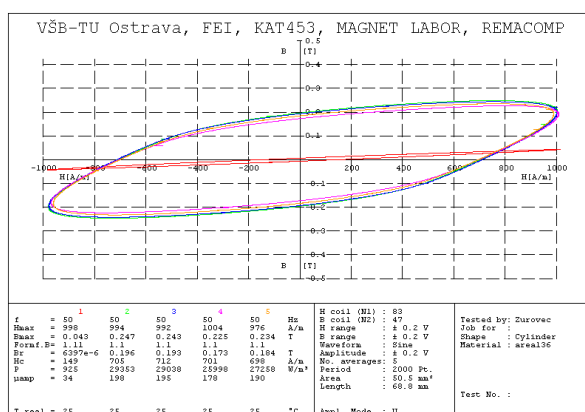
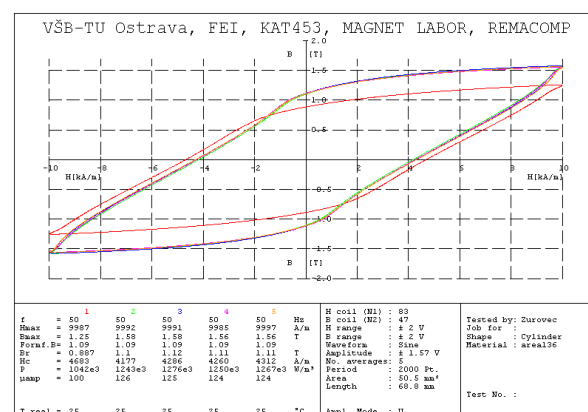
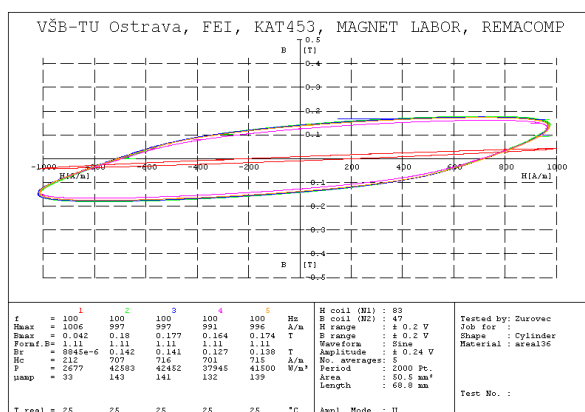
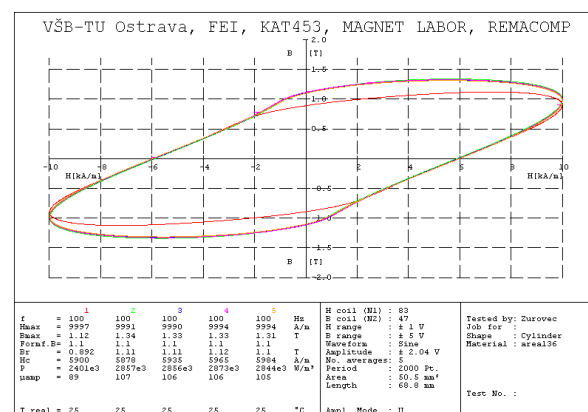
V každém z obrázků jsou vykresleny hysterezní smyčky všech vzorků dané série pro uvedené parametry.

### Výsledky dynamického měření – Série 1

## Porovnání vzorků

AC BH-char pro  $H_{max} = 1 \text{ kA/m}$  a  $f = 25 \text{ Hz}$ 

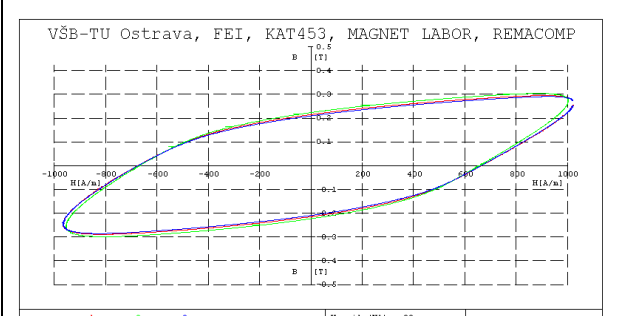
## AC BH-char pro Hmax = 10 kA/m a f = 25 Hz

AC BH-char pro  $H_{\max} = 1 \text{ kA/m}$  a  $f = 50 \text{ Hz}$ AC BH-char pro  $H_{max} = 10 \text{ kA/m}$  a  $f = 50 \text{ Hz}$ AC BH-char pro  $H_{\max} = 1 \text{ kA/m}$  a  $f = 100 \text{ Hz}$ AC BH-char pro  $H_{max} = 10 \text{ kA/m}$  a  $f = 100 \text{ Hz}$ 

### Výsledky dynamického měření – Série 2

Porovnání vzorků	
------------------	--

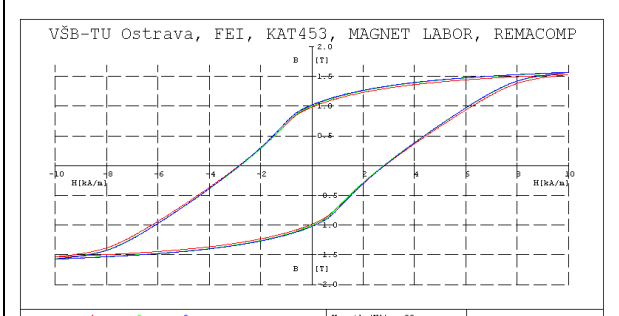
AC BH-char pro  $H_{max} = 1 \text{ kA/m}$  a  $f = 25 \text{ Hz}$



f	=	25	25	25		H coil (M1)	=	62	Tested by:	Zurovec
Bmax	=	990	980	999		S coil (M2)	=	62	Job for :	
F	=	0.292	0.292	0.292	A/n	E range	=	0.2 V	Shape	Cylinder
Formt=B	=	1.1	1.1	1.180		Waveform	=	Sine	Material	3706S
Rn	=	0.215	0.223	0.109	A/n	Amplitude	=	0.16 V		
M	=	669	663	669		Nc averages:	=	Period		
P	=	18927	16308	15582	W/n	Period	=	2000 Pz		
ttemp	=	233	245	230		Area	=	nan*		
						Length	=	69.12 mm		
T real = 25					*C	Appl. Mode = U			Test No. :	

# MOUNTED-FITTED IN Dr. Steinbocker GmbH, Köln 1980-1983, 1512/88

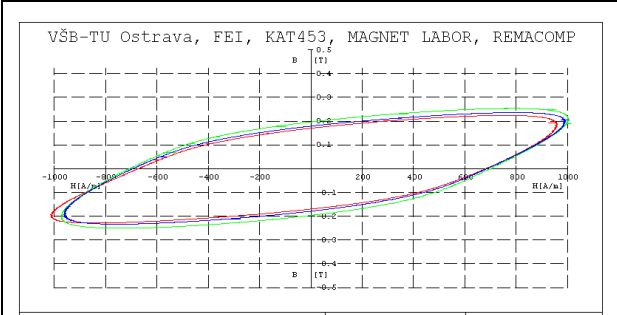
AC BH-char pro Hmax = 10 kA/m a f = 25 Hz
---



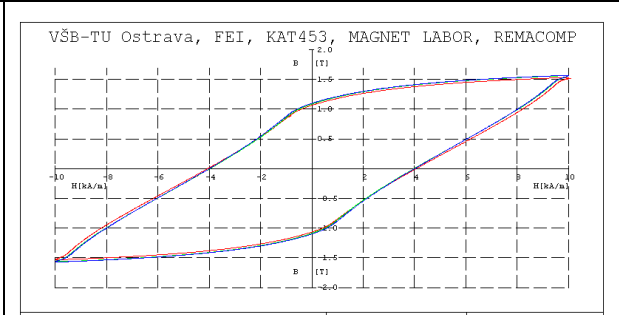
f	=	25		25		H	color (M1)	=	42	Tested by:	Zurovec
B	Dmax	=	9980	9979	9994	M/a	S color (M2)	=	1 V	Job for :	
B	Dmin	=	1.53	1.53	1.7	N/a	S range	=	1 V	Shape	Cylinder
F	FormB	=	1.08	1.07	1.07		Waveform	=	sin	Material	3706S
P	R	=	0	0.985	0.91	A/m	Amplitude	=	3.19 V		
PC	E	=	2835	2790	2824	T	No. averages:	=	1		
W	F	=	413963	412678	425979	W/a	Period	=	2000 Pz		
tump		=	122	125	125		Area	=	49.9% m		
							Length	=	69.12 mm		
										Test No. :	
<hr/>											
T real = 26						°C		Appl. Mode : U			

© HANDEL-STEINER & CO. Statistische DBMS, Köln 1988-1989, 1512/88

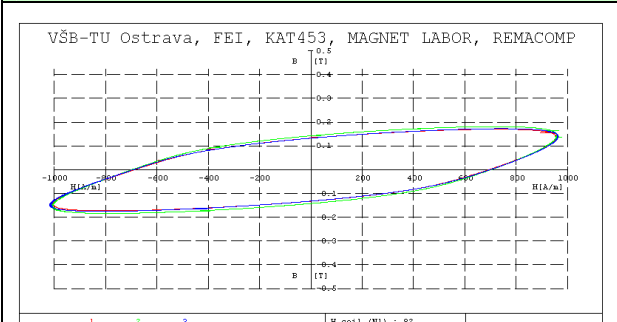
AC BH-char pro  $H_{\max} = 1 \text{ kA/m}$  a  $f = 50 \text{ Hz}$

[illegible]

AC BH-char pro Hmax = 10 kA/m a f = 50 Hz
---

[illegible]

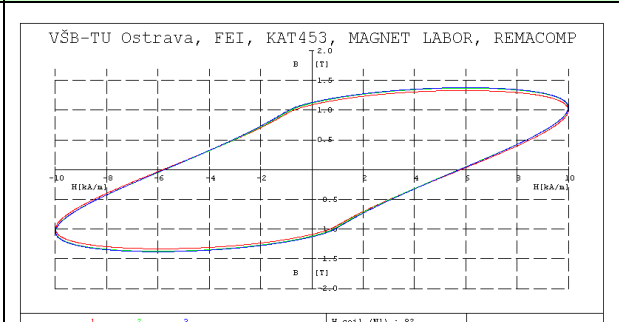
AC BH-char pro  $H_{\max} = 1 \text{ kA/m}$  a  $f = 100 \text{ Hz}$



f	= 100	100		H	% coal (M2) :	47	Tested by:	Zyurov
Rmax	= 982	592	591	A/s	N range :	0.5 V	Job for :	Cimmer
Wmax	= 172	182	180	T	B range :	0.2 V	Shape :	Kryukov
Formf.B =	1.11	1.11	1.11		Waveform :		Material :	37065
U	= 0.133	144	132	23 V	Amplitude :	23 V		
Hc	= 690	699	699	T	No. averages:			
Wc	= 3951	4202	3975	M/a*	Period :	2000 Pz		
pmap	= 139	146	140		Area :	48.36 nm²		
					Length :	69.12 nm		
T real = 25 °C				°C				Test No. :
t real = 25 °C				°C				

© MAGNET-POSITIVE Dr. Steingewand GmbH, Köln 1980-2008, 1512/06

AC BH-char pro Hmax = 10 kA/m a f = 100 Hz



f	= 100	100	100	Hz	H	coil (M2) :	Tested by: Zurovec
Mass	= 9990	9997	9999	g	M	R range :	Job for :
Mass	= 1.33	1.37	1.38	g	M	R range :	Shape :
Form:B	= 1.1	1.1	1.1	g	M	Waveform :	Material : 37065
Form:B	= 1.09	1.12	1.13	g	M	Amplitude :	
Mass	= 8010	37900	3763	g	T	No. averages:	
Temp	= 28140	28773	29063	°C	W	Period :	
μmap	= 106	109	110			Area :	
						Length :	
T_real = 26				°C	Ampl. Mode :		
T_ideal = 25				°C	Test No. :		

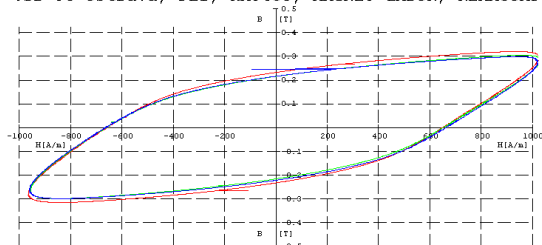
# Výsledky dynamického měření – Série 3

## Porovnání vzorků

AC BH-char pro  $H_{max} = 1 \text{ kA/m}$  a  $f = 25 \text{ Hz}$

AC BH-char pro  $H_{max} = 10 \text{ kA/m}$  a  $f = 25 \text{ Hz}$

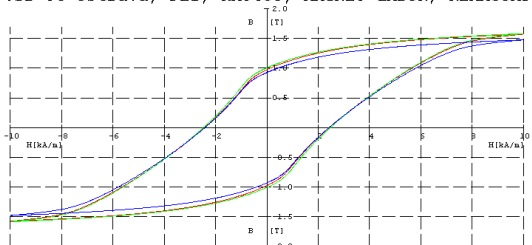
VŠB-TU Ostrava, FEI, KAT453, MAGNET LABOR, REMACOMP



f	=	25	25	25	25
Hmax	=	1013	995	999	999
Bmax	=	0.317	0.301	0.299	0.299
Formf.B	=	1.1	1.11	1.1	1.1
Bt	=	0.202	0.215	0.212	0.212
Hc	=	655	656	662	662
F	=	18949	18931	18028	18028
jump	=	249	241	239	239
H coil (M1)	:	139			
B coil (M2)	:	74			
H range	:	± 0.2 V			
B range	:	± 0.2 V			
Waveform	:	Sine			
Amplitude	:	± 0.10 V			
No. averages	:	5			
Period	:	2000 Pp			
Area	:	33.66 mm²			
Length	:	102.4 mm			
Tested by:	:	Zuravac			
Job for	:				
Shape	:	Cylinder			
Material	:	41899			
Test No.	:				

© MAGNET-PHYSIK BV, STATISCHENWEG 6080, 8014 1980-2009, 1512/98

VŠB-TU Ostrava, FEI, KAT453, MAGNET LABOR, REMACOMP



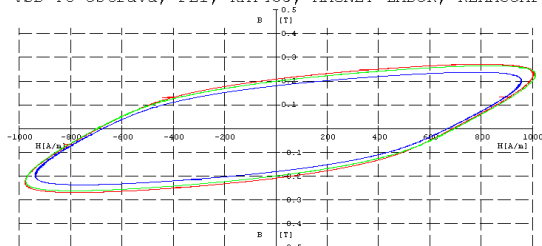
f	=	25	25	25	25
Hmax	=	9990	9988	9988	9988
Bmax	=	1.57	1.58	1.48	1.48
Formf.B	=	1.07	1.07	1.07	1.07
Bt	=	0.974	1.01	0.929	0.929
Hc	=	2428	2476	2420	2420
F	=	37457	38211	349479	349479
jump	=	125	126	110	110
H coil (M1)	:	139			
B coil (M2)	:	74			
H range	:	± 1 V			
B range	:	± 2 V			
Waveform	:	Sine			
Amplitude	:	± 1.04 V			
No. averages	:	5			
Period	:	2000 Pp			
Area	:	33.66 mm²			
Length	:	102.4 mm			
Tested by:	:	Zuravac			
Job for	:				
Shape	:	Cylinder			
Material	:	41899			
Test No.	:				

© MAGNET-PHYSIK BV, STATISCHENWEG 6080, 8014 1980-2009, 1512/98

AC BH-char pro  $H_{max} = 1 \text{ kA/m}$  a  $f = 50 \text{ Hz}$

AC BH-char pro  $H_{max} = 10 \text{ kA/m}$  a  $f = 50 \text{ Hz}$

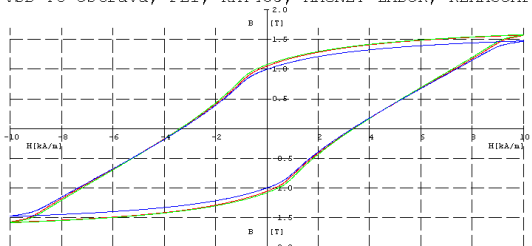
VŠB-TU Ostrava, FEI, KAT453, MAGNET LABOR, REMACOMP



f	=	50	50	50	50
Hmax	=	994	994	949	949
Bmax	=	0.269	0.263	0.267	0.267
Formf.B	=	1.1	1.11	1.11	1.11
Bt	=	0.200	0.209	0.19	0.19
Hc	=	690	696	669	669
F	=	11040	10021	25060	25060
jump	=	216	210	198	198
H coil (M1)	:	139			
B coil (M2)	:	74			
H range	:	± 0.2 V			
B range	:	± 0.2 V			
Waveform	:	Sine			
Amplitude	:	± 0.21 V			
No. averages	:	5			
Period	:	2000 Pp			
Area	:	33.66 mm²			
Length	:	102.4 mm			
Tested by:	:	Zuravac			
Job for	:				
Shape	:	Cylinder			
Material	:	41899			
Test No.	:				

© MAGNET-PHYSIK BV, STATISCHENWEG 6080, 8014 1980-2009, 1512/98

VŠB-TU Ostrava, FEI, KAT453, MAGNET LABOR, REMACOMP



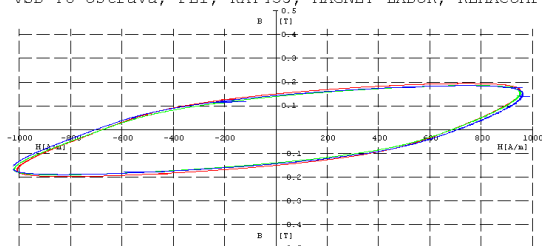
f	=	50	50	50	50
Hmax	=	9986	9993	10010	10010
Bmax	=	1.46	1.58	1.47	1.47
Formf.B	=	1.09	1.09	1.09	1.09
Bt	=	1.12	1.15	1.07	1.07
Hc	=	3367	3386	3322	3322
F	=	1392e3	1341e3	954133	954133
jump	=	125	126	117	117
H coil (M1)	:	139			
B coil (M2)	:	74			
H range	:	± 2 V			
B range	:	± 2 V			
Waveform	:	Sine			
Amplitude	:	± 2.04 V			
No. averages	:	5			
Period	:	2000 Pp			
Area	:	33.66 mm²			
Length	:	102.4 mm			
Tested by:	:	Zuravac			
Job for	:				
Shape	:	Cylinder			
Material	:	41899			
Test No.	:				

© MAGNET-PHYSIK BV, STATISCHENWEG 6080, 8014 1980-2009, 1512/98

AC BH-char pro  $H_{max} = 1 \text{ kA/m}$  a  $f = 100 \text{ Hz}$

AC BH-char pro  $H_{max} = 10 \text{ kA/m}$  a  $f = 100 \text{ Hz}$

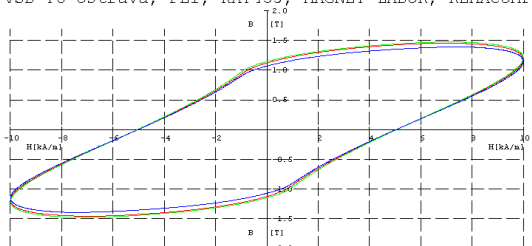
VŠB-TU Ostrava, FEI, KAT453, MAGNET LABOR, REMACOMP



f	=	100	100	100	100
Hmax	=	983	993	1008	1008
Bmax	=	0.186	0.188	0.187	0.187
Formf.B	=	1.11	1.11	1.11	1.11
Bt	=	0.15	0.14	0.144	0.144
Hc	=	681	680	707	707
F	=	43307	41664	43308	43308
jump	=	158	151	147	147
H coil (M1)	:	139			
B coil (M2)	:	74			
H range	:	± 0.2 V			
B range	:	± 0.2 V			
Waveform	:	Sine			
Amplitude	:	± 0.27 V			
No. averages	:	5			
Period	:	2000 Pp			
Area	:	33.66 mm²			
Length	:	102.4 mm			
Tested by:	:	Zuravac			
Job for	:				
Shape	:	Cylinder			
Material	:	41899			
Test No.	:				

© MAGNET-PHYSIK BV, STATISCHENWEG 6080, 8014 1980-2009, 1512/98

VŠB-TU Ostrava, FEI, KAT453, MAGNET LABOR, REMACOMP



f	=	100	100	100	100
Hmax	=	9994	9991	9994	9994
Bmax	=	1.46	1.48	1.59	1.59
Formf.B	=	1.1	1.1	1.1	1.1
Bt	=	1.12	1.15	1.07	1.07
Hc	=	5042	5057	5029	5029
F	=	2792e3	2840e3	2558e3	2558e3
jump	=	116	110	111	111
H coil (M1)	:	139			
B coil (M2)	:	74			
H range	:	± 1 V			
B range	:	± 2 V			
Waveform	:	Sine			
Amplitude	:	± 2.04 V			
No. averages	:	5			
Period	:	2000 Pp			
Area	:	33.66 mm²			
Length	:	102.4 mm			
Tested by:	:	Zuravac			
Job for	:				
Shape	:	Cylinder			
Material	:	41899			
Test No.	:				

© MAGNET-PHYSIK BV, STATISCHENWEG 6080, 8014 1980-2009, 1512/98

### 3.2.4 Celkové zhodnocení výsledků

Z výsledků provedených měření typových konstrukčních ocelí je patrné, že z pohledu magnetických vlastností patří do skupiny magneticky měkkých materiálů. U deseti vzorků byla při statickém magnetování naměřena úzká hysterezní smyčka s koercitivní silou ( $H_c$ ) pohybující se v rozmezí 800 až 900 A/m, a remanentní indukci v rozmezí 0,7 až 0,9 T. Pouze u vzorku č. 1 (kolejnicová ocel AREA 136) byla naměřena širší hysterezní smyčka s koercitivní silou ( $H_c$ ) přibližně 2400 A/m a remanentní indukci přibližně 1,2 T. To znamená, že tato ocel je o něco magneticky tvrdším materiálem, než jsou zbylé měřené oceli. Porovnání statických hysterezních smyček všech 11 vzorků v jednom grafu je znázorněno v tištěné příloze 1.

Při měření v dynamickém magnetickém poli vykazoval nejrozdílnější magnetické vlastnosti vzorek č. 1 (kolejnicová ocel AREA 136) obdobně jako při statickém měření. Z výsledků je také patrné, jak se mění magnetické vlastnosti ocelí se změnou frekvence budícího magnetického pole. Se zvyšující se frekvencí dochází k většímu zkreslení a rozšíření hysterezní smyčky. To znamená, že čím vyšší je frekvence budícího pole, tím vyšší jsou hysterezní ztráty.

Konkrétní hodnoty změřených magnetických parametrů a BH charakteristik typových konstrukčních ocelí, pro statické i dynamické magnetické pole jsou ve zmenšené formě uvedeny v textu této práce. Podrobnější přehledy v plném rozlišení jsou uvedeny v přílohách, umístěných na disku CD.

## 4 Závěr

V této diplomové práci bylo mým úkolem zjistit magnetické vlastnosti typových konstrukčních ocelí používaných převážně pro výrobu kolejnic. Během psaní této práce jsem si rozvinul vědomosti o konstrukčních ocelích, zejména pak o jejich magnetických vlastnostech při praktickém měření. Také jsem získal povědomí o způsobu zjišťování magnetických vlastností konstrukčních materiálů.

Nejpracnější praktickou částí byla příprava vzorků ocelí k vlastnímu měření, hlavně z důvodu nemalého počtu vzorků. Každý vzorek musel projít sérií úprav jako je otupení ostrých hran, navinutí izolace a hlavně navinutí měřícího a budícího vinutí. Podrobný popis těchto úkonů je v práci uveden. Následné vlastní měření magnetických vlastností již nebylo tak pracné, ale zato časově náročné.



## Literatura a jiné zdroje

- [1] Fremunt, P., Podrábský, T.: *Konstrukční oceli*, CERM, Brno 1996
- [2] Draxler, K., Kašpar, P., Ripka, P.: *Magnetické prvky a měření*, ČVUT, Praha 2008
- [3] Trnka, Z., Dufek, M.: *Magnetická měření*, SNTL 1964
- [4] Brož, J.: *Moderní problémy feromagnetismu*, (ČSAV 1962
- [5] Marek, M.: *Zjišťování magnetických vlastností konstrukčních materiálů, specifické příklady užití a aplikací magnetických měření*, Disertační práce 2005
- [6] Žurovec, R.: *Průzkum trhu – permanentní magnety*, Bakalářská práce, VŠB-TUO Ostrava, 2008
- [7] Leinveber, J., Vávra, P.: *Strojnické tabulky*, ALBRA 2003
- [8] Píšek, F., Jeníček, L., Ryč, P.: *Nauka o materiálu I*, Academia, Praha 1973
- [9] MAGNET-PHYSIK Dr. Steingrover GmbH (firemní literatura),
  - Remacomp-C, Operating instructions
  - Remagraph-C, Operating instructions
- [10] Hassdenteufel, J.: *Elektrotechnické materiály*, SNTL Bratislava, 1971
- [11] Třinecké železářny, a.s., <http://www.trz.cz/>

# Seznam příloh

## Tištěné přílohy:

Příloha č.1 – Porovnání BH statických hysterezních charakteristik pro  $H_{\max}=5000$  A/m.

## Přílohy na CD:

Adresář (složka) – Diplomová práce Bc. Roman Žurovec:

### 1. Přehled ocelí

Adresář (složka) – Diplomová práce Bc. Roman Žurovec:

Složka – Výsledky statického měření:

1. Ocel č. 1
2. Ocel č. 2
3. Ocel č. 3
4. Ocel č. 4
5. Ocel č. 5
6. Ocel č. 6
7. Ocel č. 7
8. Ocel č. 8
9. Ocel č. 9
10. Ocel č. 10
11. Ocel č. 11
12. Porovnání série 1
13. Porovnání série 2
14. Porovnání série 3

Složka – Výsledky dynamického měření:

1. Ocel č. 1
2. Ocel č. 2
3. Ocel č. 3
4. Ocel č. 4
5. Ocel č. 5
6. Ocel č. 6
7. Ocel č. 7
8. Ocel č. 8
9. Ocel č. 9
10. Ocel č. 10
11. Ocel č. 11
12. Porovnání BH-char série 1
13. Porovnání BH-char série 2
14. Porovnání BH-char série 3
15. Porovnání MAG-char série 1
16. Porovnání MAG-char série 2
17. Porovnání MAG-char série 3

## Příloha č. 1

Porovnání BH statických hysterezních charakteristik pro  $H_{\max}=5000 \text{ A/m}$

